INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

TECNOLOGÍA
Nueve ideas innovadoras

INSECTOS
Las hormigas y el arte de la guerra

SALUD MENTAL
Epigenética de la adicción y la depresión

FÍSICA
¿Se está asomando el Higgs?

DOSSIER DE ARQUEOLOGÍA COGNITIVA

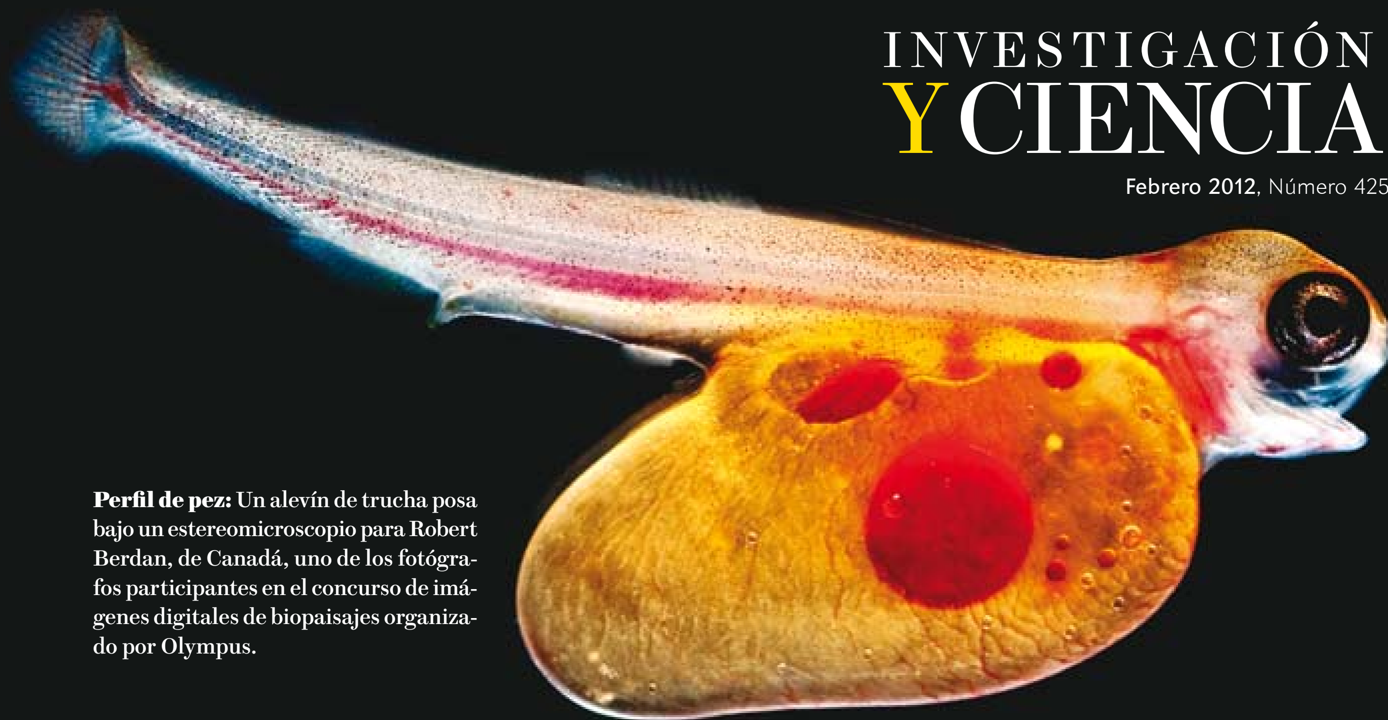
Orígenes del pensamiento

Genética, neurología y evolución de la cognición humana



6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Febrero 2012, Número 425



Perfil de pez: Un alevín de trucha posa bajo un estereomicroscopio para Robert Berdan, de Canadá, uno de los fotógrafos participantes en el concurso de imágenes digitales de biopaisajes organizado por Olympus.

40



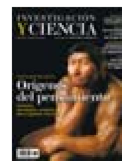




INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Durante los últimos años, la investigación sobre la evolución cognitiva de nuestra especie ha recibido un nuevo impulso gracias a los avances en genética, neurología y psicología, entre otras áreas. Juntas dan forma a un prometedor campo multidisciplinar: la arqueología cognitiva. Ilustración de *Homo neanderthalensis* de Juraj Lipták, Museo de Prehistoria de Halle y Oficina para la Arqueología y la Preservación del Legado Histórico de Sajonia-Anhalt.

LAS RAZONES DEL ÉXITO

Luis M. A. Bettencourt y Geoffrey B. West, en «Grandes urbes: conseguir más con menos» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2011], sostienen que en una ciudad con rentas elevadas solo prosperarán las actividades que aporten un valor añadido. Se inicia así un ciclo en el que más individuos con talento se sienten atraídos por la urbe, suben las rentas y crece la necesidad de actividades productivas. Pero un aumento en el alquiler de los locales comerciales implica consecuencias negativas para numerosos pequeños comercios, como peluquerías, tintorerías o tiendas de ultramarinos. Hay aún muchos servicios que no pueden obtenerse en Internet.

Ronald Bourke
Brooklyn

A Bettencourt y West parece extrañarles que el área de la bahía de San Francisco y la región de Boston superen en prosperidad a conglomeraciones urbanas de tamaño similar. Atribuyen el hecho a «cualidades intangibles de dinámica social, más que al desarrollo de infraestructuras materiales». Sin embargo, por más que centros como el Instituto de Tecnología de Massachusetts y universidades como Harvard, Stanford o Berkeley inspiren sin duda cualidades intangibles en sus alumnos, son también «infraestructura material», lo que probablemente explique gran parte del desarrollo económico de esas zonas.

Lee Otterholt
Laguna Beach, California

La correlación entre patentes y número de habitantes que establecen Bettencourt y West confunde causas y efectos. Las ciudades crecen, sobre todo, porque el éxito de las grandes compañías tecnológicas atrae a trabajadores de todo el mundo, no porque el entorno urbano estimule la innovación. En Silicon Valley, donde resido, la mayor parte de la creatividad proviene de los suburbios situados entre San Francisco y la ciudad de San José. Y, tanto aquí como en Dallas, las empresas se esfuerzan por construir grandes espacios abiertos con aire de campus informal. La innovación surge de una combinación del afán emprendedor, la disponibilidad de capital riesgo, el acceso a la universidad, una mano de obra diversa y con movilidad, y un lugar donde la gente desea vivir.

Ben Roberts
Sunnyvale, California

EDUCACIÓN Y POBREZA

En «Cerebros sobre edificios» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2011], Edward Glaeser defiende que la educación se muestra más importante para la salud de una ciudad que los proyectos de infraestructuras. Su razonamiento es válido, pero superficial. Para que una comunidad pobre prospere necesita sin duda una educación gratuita y de calidad, pero la gente también necesita comer.

El artículo no menciona las barreras que en los últimos años se han interpuesto para acceder a los dos valores que ofrece el desarrollo urbano: educación e innovación empresarial. La universidad de San Francisco, por ejemplo, resulta demasiado cara para la mayoría de los residentes de Hunter's Point, y los recortes en personal y recursos la han convertido en superflua para muchos. Por otra parte, todos propugnamos el espíritu emprendedor, pero tropezamos con unas exigencias cada vez más elevadas para acceder a préstamos abusivos. Y sin dinero una empresa no puede sostenerse. Glaeser tampoco considera las clases pudientes, bien formadas y llenas de afán innovador, que están empujando hacia la periferia a los sectores menos favorecidos.

Si las personas con menos recursos ven que la educación les beneficia en algo y les ayuda a alimentar a sus familias, la buscarán con empeño. ¿Qué otra razón mejor?

Mary Ratcliff
San Francisco Bay View

LA HAZAÑA DE SCOTT

Discrepo de Edward J. Larson en su visión sobre las expediciones al Polo Sur en «Un héroe de mayor gloria» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2011]. Al margen del sentimiento de solidaridad con un grupo de valientes que perdieron la vida en el empeño, la realidad de los hechos confirma que fue Amundsen, y no Scott, quien se guió por el método científico.

El fatal desenlace se debió a una planificación nefasta y a no haber aprovechado el conocimiento científico de la época. Una alimentación deficiente llevó al grupo de Scott a enfermar de escorbuto. Calcular mal las necesidades calóricas y no disponer de márgenes de seguridad les llevó a la muerte. Una mala elección del material de abrigo y el uso de métodos de transporte inadecuados y no probados (como elementos de tracción mecánica que se estropearon con rapidez, o el uso de ponis poco adaptados al frío, en lugar de los perros empleados por los noruegos) provocaron penurias y retrasos que les alejaron de las fechas con mayor probabilidad de gozar de buen tiempo. Establecer pocos y mal señalizados depósitos de víveres y guardar el queroseno sin la estanqueidad necesaria constituyeron improvisaciones de consecuencias fatales. Y perder parte de un día en recoger fósiles cuando el éxito del regreso era dudoso, nueve días antes del fallecimiento de uno de los expedicionarios por agotamiento y escorbuto, fue una temeridad.

Sin duda, Scott y su grupo realizaron una hazaña de auténticos héroes, pero sin la metodología que establecía el método científico y el sentido común.

Xavier Bros
Sabadell, Barcelona



Noviembre y diciembre 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

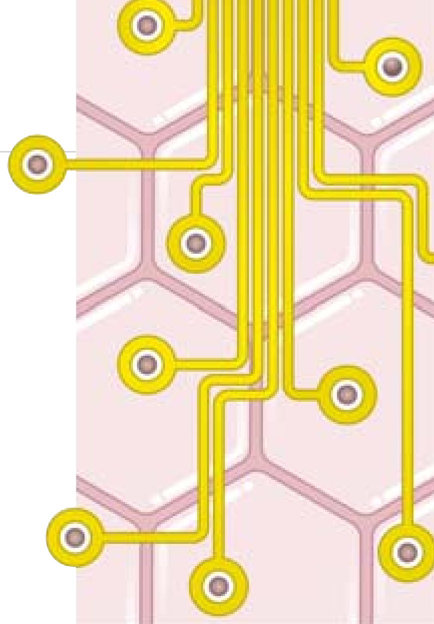
Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

INGENIERÍA BIOMÉDICA

Un circuito en cada célula



Los especialistas en nanomedicina han soñado durante mucho tiempo con una nueva era en la que se pudieran integrar ordenadores de tamaño molecular en nuestros cuerpos. Los dispositivos monitorizarían nuestra salud y tratarían las enfermedades antes de que empeoráramos. La ventaja de estos ordenadores, que se fabricarían con materiales biológicos, residiría en su capacidad de hablar el idioma bioquímico de la vida.

En tiempo reciente, varios grupos han logrado avances en este campo. Un equipo del Instituto Tecnológico de California ha descrito en la revista *Science* un experimento en el que utilizaban nanoestructuras de ADN, denominadas puertas lógicas de balancín (*seesaw gates*), para crear circuitos lógicos similares a los empleados en los microprocesadores. Del mismo modo que los componentes de silicio utilizan la corriente eléctrica para representar unos y ceros, los circuitos con base biológica usan las concentraciones de moléculas de ADN en un tubo de ensayo. Cuando se añaden al tubo nuevas cadenas de ADN, o «datos de entrada», la disolución sufre una cascada de interacciones químicas para dar lugar a otras cadenas de ADN distintas, los «datos de salida». En teoría, la entrada podría estar representada por un indicador molecular de una enfermedad, y la salida, por una molécula terapéutica apropiada. Uno de los problemas más habituales para crear un ordenador en un tubo de ensayo se debe a la dificultad de controlar las interacciones moleculares que se van a producir. La originalidad de las puertas lógicas de balancín es que cada puerta responde solo a cadenas específicas de ADN de entrada.

En un artículo posterior publicado en la revista *Nature*, el equipo del Instituto Tecnológico de California mostró las posibilidades de esa técnica, al construir un circuito a base de ADN que podía resolver un sencillo juego de memorización. Un circuito con memoria que se integrase en células vivas podría reconocer y tratar enfermedades complejas a partir de una serie de datos biológicos.

Hasta ahora, esos circuitos no han podido integrarse en los tejidos vivos, en parte porque aún no pueden comunicarse con las células. Zhen Xie, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y sus colaboradores han conseguido hace poco avances en este sentido. Según afirmaron en un artículo publicado en *Science*, diseñaron un circuito a base de ARN, aún más sencillo, que distinguía las células cancerosas de las no cancerosas y, lo que es más importante, haría que las células cancerosas se autodestruyeran.

Esas técnicas se han aplicado solo en medios artificiales. Sin embargo, los progresos realizados en los circuitos a base de ADN permiten albergar esperanzas de que algún día se cumplan los sueños bioinformáticos de numerosos investigadores.

—Tim Requarth y Greg Wayne

¿QUÉ ES ESTO?



Proliferación de medusas: Como depredadores, las medusas resultan lentas y pasivas. Incapaces de nadar y perseguir a sus presas, la mayoría de ellas se dejan llevar por la corriente y crean pequeños remolinos que atraen la comida hacia sus tentáculos. Sin embargo, en las aguas del mar de Japón o del mar Negro prosperan las medusas como las que se observan en la imagen, mientras que muchos de sus competidores son eliminados por la sobreexplotación pesquera y otros efectos de la presencia humana. ¿Cómo han logrado estos invertebrados dar la vuelta a millones de años de dominio de los peces, aparentemente de la noche a la mañana? José Luis Acuña, de la Universidad de Oviedo, y sus colaboradores sugieren en la revista *Science* que las medusas muestran una eficacia equiparable a la de los peces en capturar a sus presas y convertirlas en energía. De hecho, han preparado el terreno para hacerse con el control del medio, un escenario denominado «océano gelatinoso» por algunos científicos. *—David Biello*

THOMAS FUCHS (*circuito*); CORTESÍA DE ACUÑA FOTOGRAFÍA Y ACUARIO DE GIJÓN (*medusas*)

FISIOLOGÍA

Del polen al poliéster

Los colétidos o «abejas del poliéster», presentes en todo el mundo, construyen túneles bajo tierra, de una anchura similar a la de un dedo meñique, en los que ponen sus huevos. Para proteger a sus larvas del calor, el frío, los hongos, las bacterias y otros peligros, las abejas cubren estos túneles con una sustancia transparente, parecida al celofán. Las larvas viven bajo tierra la mayor parte del tiempo, en estas celdas reforzadas.

Debbie Chachra, profesora de ciencia de los materiales en la Escuela de Ingeniería Franklin W. Olin, en Massachusetts, se enteró por casualidad de su existencia en Internet. Más adelante, solicitó muestras de sus nidos al Museo de Historia Natural de Nueva York. Su grupo ha estado investigando las celdas e intentando averiguar de qué están hechas, aunque todavía no han publicado los resultados.

El estudio de las celdas plantea enormes obstáculos, precisamente porque se hallan preparadas para que resulte difícil destruirlas. Chachra se halló ante el dilema de que cualquier producto suficientemente potente como para degradarlas era demasiado agresivo para usarlo con sus equipos, o bien, que cualquier sustancia que pudiera usar en sus equipos no podía degradar las celdas.



Abeja del género *Colletes*

A pesar de todo, demostraron que no estaban formadas únicamente por plástico. Las abejas colocan primero fibras de seda y sobre ellas depositan el plástico (como en la fibra de vidrio), lo que confiere una gran resistencia al material. En la actualidad Chachra está trabajando con bacteriólogos para hallar una bacteria que posea la capacidad de degradar el plástico.

La razón principal de su interés por este fascinante material se debe a su carácter no biodegradable, si bien presenta un origen biológico. Podría tratarse de un material robusto en condiciones normales, pero susceptible de ser triturado y reutilizado.

—Rose Eveleth

CORTESÍA DE GILL PRATT, ESCUELA DE INGENIERÍA FRANKLIN W. OLIN (*abejas*); MARK A. KLINGLER, MUSEO CARNEGIE DE HISTORIA NATURAL (*Juramaia*)

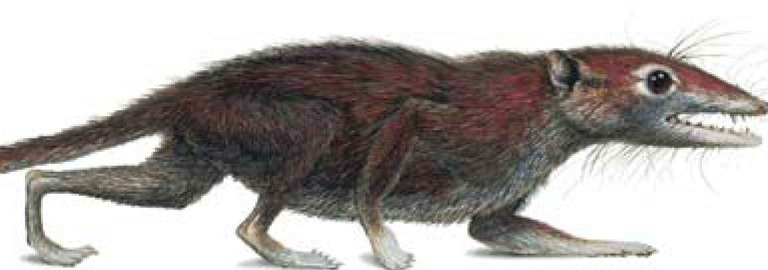
PALEONTOLOGÍA

El origen más remoto de los mamíferos con placenta

La mayoría de las personas piensan en la placenta como algo que se desecha después del parto. De hecho, su aparición hace millones de años constituyó un desarrollo evolutivo muy significativo, que dio lugar a la gran mayoría de los mamíferos que existen en la actualidad, como murciélagos, ballenas o humanos.

Hasta ahora, se creía que los mamíferos placentarios habían surgido hace unos 130 millones de años, cuando se separaron de la rama que dio origen a los modernos marsupiales, que nutren a sus crías en bolsas, en lugar de placentas. Sin embargo, un fósil recién hallado precede a esa bifurcación en unos 35 millones de años, con lo que se demuestra que los mamíferos con placentas o euterios, compartieron la Tierra con los dinosaurios durante mucho más tiempo de lo que se pensaba.

El fósil, descrito en agosto del año pasado en la revista *Nature*, corresponde a un pequeño animal parecido a una musaraña. Denominado *Juramaia sinensis*, vivió en China hace 160 millones de años. Parece ser el ancestro conocido más antiguo de los mamíferos placentarios, según un grupo de investigadores dirigido por Zhe-Xi Luo, paleontólogo del Museo Carnegie de Historia Natural.



La alimentación en la placenta permite una transferencia más rápida y eficiente de los nutrientes desde la madre a las crías, lo que permite un desarrollo cerebral más rápido, un cerebro adulto de mayor tamaño y una tasa metabólica más alta. Esas características repercutieron de forma importante en la evolución de la complejidad etológica y social observada entre los mamíferos actuales.

El fósil de *Juramaia* ofrece también indicios relevantes sobre la vida de los primeros euterios. Seguramente fue insectívoro, a juzgar por la forma de sus dientes, y poseía patas delanteras robustas que le debieron de ayudar a trepar a los árboles. Esa capacidad le habría facilitado la ocupación de territorio aún sin explotar, con lo que aumentaría su seguridad respecto a los depredadores y el acceso a los insectos entre el follaje. Cualquier oportunidad de reducir la competencia de otros mamíferos jurásicos, como el apostarse en zonas más elevadas, habría reforzado las diferencias entre *Juramaia* y los marsupiales, y convertiría al primero en el ancestro de un grupo de animales muy diferente.

El descubrimiento de este fósil corrobora estudios moleculares anteriores, que estimaban que la diferenciación entre euterios y otros mamíferos se produjo hace 160 millones de años, si bien dichos cálculos suelen considerarse provisionales hasta que las pruebas físicas, como los fósiles, lo demuestren. Ofrece un ejemplo perfecto de la forma en que múltiples líneas de investigación se unen para obtener conclusiones robustas e hipótesis bien fundamentadas. Se subraya así el valor de los enfoques integrales para responder a preguntas científicas.

—Anne-Marie Hodge

COSMOLOGÍA

¿Tiene el universo un eje?

El universo no posee centro, fronteras ni regiones especiales: con independencia de hacia dónde miremos, su aspecto a gran escala siempre es el mismo. Así al menos reza el principio cosmológico, uno de los pilares en lo que a nuestra concepción moderna del universo se refiere. Sin embargo, algunos indicios obtenidos durante los últimos años han puesto en duda dicho postulado: al parecer, el universo podría contar con una dirección privilegiada.

Una de esas indicaciones proviene de la radiación de fondo cósmico de microondas. Como cabría esperar, dicha radiación no exhibe un aspecto completamente uniforme, sino que se encuentra plagada de pequeñas irregularidades que motean el cielo. Algunas observaciones, sin embargo, sugieren que esas pequeñas «manchas» no se reparten al azar, sino que se alinearían a lo largo de una dirección que, con cierta teatralidad, algunos cosmólogos han bautizado como «eje del mal».

Otras pistas provienen de los estudios sobre supernovas lejanas. En 1998, el estudio de estas explosiones estelares permitió deducir que el universo actual se halla en una fase de expansión acelerada, un descubrimiento que el año pasado fue galardonado con el premio Nobel de Física. Algunos muestreos recientes indican que esa aceleración podría tomar un valor máximo a lo largo de cierta dirección, muy próxima al eje del mal. De manera similar, se ha observado que las velocidades peculiares de los cúmulos de galaxias parecen mostrar cierta preferencia por apuntar en una misma dirección, no tan distinta de las anteriores.

¿Qué significa todo eso? Quizá nada. «Podría tratarse de una casualidad», afirma Dragan Huterer, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. O puede que se haya cometido algún error en el análisis de los datos. Sin embargo, señala Huterer, tal vez estemos asistiendo a los primeros indicios de «algo asombroso». El primer instante de expansión del universo podría haber durado algo más de lo que se cree y, con ello, haber provocado la deformación que vemos hoy. Según Glenn D. Starkman, de la Universidad Case de la Reserva Occidental, otra posibilidad reside en que, a gran escala, el universo se encuentre enrollado sobre sí mismo a lo largo de una dirección, con una geometría análoga a la de un dónut. O quizá la energía oscura, la misteriosa sustancia responsable de la expansión acelerada del universo, actúe de maneras diferentes en lugares distintos.



Quizá las galaxias se estén alejando con mayor rapidez en algunas direcciones.

Por el momento, los datos son preliminares y no aportan sino leves indicios del fenómeno. Ahora los cosmólogos esperan con interés los datos del satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea, que actualmente se encuentra tomando mediciones muy precisas del fondo de microondas. Sus datos confirmarán las medidas realizadas hasta el momento... o dejarán al eje del mal reducido a una anécdota sin mayor interés.

—Michael Moyer

FÍSICA

Dinámica de fluidos en una taza de café



Hace poco, en un congreso de matemáticas, Rouslan Krechetnikov reparó en la manera en que los asistentes transportaban sus tazas de café. ¿Por qué en unas ocasiones se derramaba y en otras no? La pregunta, de apariencia trivial, dio origen a un proyecto de investigación. Según explica Krechetnikov, físico de la Universidad de California en Santa Bárbara, en el fenómeno concurren numerosos aspectos: la dinámica de fluidos, la estabilidad de la superficie de un líquido, las interacciones entre un fluido y una estructura mecánica, así como la compleja mecánica del caminar.

Junto a un estudiante de doctorado, Krechetnikov analizó varios vídeos de alta velocidad con el objetivo de estudiar el movimiento de las tazas de café y su relación con la velocidad y la marcha de cada individuo. Observaron que, una vez que los sujetos alcanzaban una velocidad constante, los movimientos del café podían descomponerse en grandes oscilaciones regulares, provocadas por el andar, así como en movimientos más leves, irregulares y frecuentes, causados por las variaciones en la marcha y por factores ambientales, como suelos irregulares o las distracciones del sujeto.

Que el café acabe derramándose o no depende en gran medida de la frecuencia natural de oscilación del líquido (el análogo a la frecuencia característica de un péndulo, determinada por su longitud). Cuando el período al que se suceden los pasos del sujeto se corresponde con dicha frecuencia natural, se produce una resonancia y aumenta la amplitud de las oscilaciones del café; el mismo fenómeno que observamos cuando impulsamos un columpio justo en el momento adecuado. También los movimientos pequeños e irregulares de la taza pueden coordinarse y amplificar el vaivén del líquido.

Krechetnikov afirma que, una vez que se entiendan en detalle los factores que influyen en el movimiento del líquido, podrán desarrollarse utensilios que eviten el derrame, como recipientes flexibles u otros provistos de anillos a lo largo de su pared interior.

—Charles Q. Choi

NASA CXC/IOA/A. FABIAN ET AL. (*imagen en rayos X*); NRAO/VLA/G. TAYLOR (*en radio*); NASA/ESA/HUBBLE HERITAGE/STSCI/AURA Y A. FABIAN, UNIVERSIDAD DE CAMBRIGE (*en el óptico*); ANTHONY BRADSHAW, GETTY IMAGES (*café*)

NEUROCIENCIA

Sensaciones incorpóreas

Cuando el cerebro actúa en el mundo real, la información se mueve en dos direcciones. La actividad eléctrica originada en la corteza motora del cerebro se transmite por la médula espinal hasta la parte del cuerpo que debe moverse. De forma simultánea, las sensaciones táctiles de la piel recorren la médula para llegar a la corteza somatosensorial del cerebro. Ambas acciones son prácticamente inseparables: sin la sensación de un suelo bajo los pies, resulta muy difícil caminar bien, y sin la sensación táctil de una taza de café, el cerebro no puede determinar la fuerza adecuada con la que deberían agarrarla los dedos. Hasta ahora, los intentos para ayudar a pacientes con parálisis a mover una prótesis solo han tenido en cuenta la mitad de nuestra interacción con el mundo. Un nuevo estudio ofrece esperanza para esas personas.

El equipo dirigido por Miguel Nicolelis, del Hospital de la Universidad de Duke, ha demostrado la posibilidad de que el cerebro de un primate no solo mueva un «cuerpo virtual» (la mano de un avatar en un monitor de ordenador), sino que también reciba señales eléctricas que codifican la sensación de los objetos virtuales que toca el avatar. La sensación se percibe con la suficiente claridad como para distinguir las texturas de los objetos. Si esta nueva técnica, descrita en *Nature*, funcionase en las personas, cambiaría la vida de los pacientes con parálisis. No solo podrían caminar y mover sus brazos y piernas, también les sería posible sentir la textura de los objetos que sostienen o tocan y el suelo que pisan.

Otros grupos están trabajando en invenciones similares. En la Universidad de Pittsburgh, varios neurólogos dirigidos por Andrew Schwartz han comenzado a buscar pacientes paralizados por lesiones medulares para que participen en un estudio semejante. Gracias a unos electrodos en la corteza somatosensorial que reciben información de un brazo robótico, los enfermos podrían «sentir» su entorno.

Nicolelis espera que su investigación dé frutos antes de 2014, año en el que planea desvelar el primer robot «que se puede llevar puesto», con ocasión del partido inaugural del Mundial de Fútbol de Brasil. Se trata de algo parecido al personaje de ficción *Iron Man*: una prótesis para todo el cuerpo, similar a un exoesqueleto, con una interfaz controlada por implantes neuronales que captan las señales de la corteza motora y permiten mover piernas, manos, dedos y otras partes del cuerpo. Presentará además una serie de sensores que retransmitirán información a la corteza somatosensorial sobre el mundo exterior.

—Sharon Begley

JANA LEON, GETTY IMAGES (*macaco*)

Errata corrige

En el artículo «El dengue en Latinoamérica», del pasado mes de enero, donde dice *2,5 billones de personas* debería leerse *2500 millones de personas*.

Como apunta nuestro lector Ángel D. Rodríguez, en el artículo «La hiperesfera», del pasado mes de diciembre, al comparar las geodésicas de una esfera con *los meridianos y los paralelos* solo deberían mencionarse los meridianos (salvo el ecuador, los paralelos terrestres no son geodésicas).

AGENDA

CONFERENCIAS

9 de febrero
Conversaciones con un neandertal
Valentín Villaverde, Universidad de Valencia
Ciclo «A ciencia cierta»
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/acienciacierta

21 de febrero
Ernest Rutherford, radiactividad y el núcleo atómico
Helge Krag, Universidad de Aarhus
Residencia de Estudiantes
Madrid
www.residencia.csic.es

EXPOSICIONES

El agua que quita el hambre
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa
www.mnactec.cat



© AKINTUNDE AKINLEYE/ACCIÓN CONTRA EL HAMBRE (*fuente*)

Prevención a un siglo del Titanic
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Los enlaces de la vida
Casa de la Ciencia-CSIC
Sevilla
enlacesdelavida.cienciadirecta.com

OTROS

Del 6 al 8 de febrero – Congreso
Biología sintética aplicada en Europa
Casa de Convalecencia
Barcelona
www.efb-central.org/index.php/syntheticbiology/C52

15 de febrero – Café científico
¿Nacerá una nueva isla?
Joan Martí, Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, CSIC
Casa Orlandai
Barcelona
www.casaorlandai.cat

ALTAS ENERGÍAS

¿Está la partícula de Higgs asomando la cabeza?

El bosón de Higgs constituye un pilar fundamental en nuestra comprensión de las leyes físicas. Puede que el LHC ya haya observado los primeros indicios de su existencia

El pasado 13 de diciembre, la comunidad internacional de física de partículas contuvo la respiración para atender una de las presentaciones científicas que más expectación ha concitado en los últimos años. Desde el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, los portavoces de los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) presentaron sus resultados sobre la búsqueda de la famosa y elusiva partícula de Higgs. Si bien los datos mostraban posibles indicios de su existencia, existen también motivos para interpretarlos con cautela.

Resulta difícil exagerar la importancia que la partícula de Higgs reviste en nuestra comprensión de las leyes fundamentales de la naturaleza. El modelo estándar, la teoría que describe las partículas elementales y sus interacciones, ha demostrado hasta la fecha un poder predictivo sin precedentes en la historia de la ciencia. Uno de sus pilares lo constituye, de hecho, la partícula de Higgs. Esta es la única predicción de calado que, hasta la fecha, no ha sido verificada por los experimentos. Por ello, tanto su descubrimiento como la refutación de su existencia supondría un hito histórico.

La importancia del Higgs

¿Por qué la partícula de Higgs resulta tan esencial? Un ingrediente fundamental del modelo estándar lo constituyen las *simetrías*. Una simetría es una transformación matemática que, aplicada a las ecuaciones básicas de la teoría, las deja invariantes; algo parecido a lo que ocurre con el aspecto de un cuadrado cuando lo rotamos 90 grados. En física de partículas, las simetrías no solo resultan satisfactorias desde un punto de vista estético, sino que comportan una consecuencia muy profunda: en algunos casos, implican la aparición de interacciones. Además, estas deben ser transmitidas por partículas de espín entero y *sin masa*.

Hoy en día, entendemos las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas (e incluso las gravitatorias) como una consecuencia de ciertas simetrías matemáticas que, por algún motivo, la naturaleza parece respetar. Este esquema no solo encaja a la perfección con las observaciones, sino que permite explicar muchas de las propiedades de las partículas... salvo por un «detalle»: las partículas mediadoras de la interacción débil, los bosones *W* y *Z*, poseen masa. Es más, esas mismas simetrías exigen, en contra de lo que indican los experimentos, que *todas* las partículas de materia (electrones, quarks, neutrinos...) carezcan de masa. La solución a este problema llegó en los años sesenta de la mano de Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, quienes incorporaron al modelo estándar lo que hoy conocemos como mecanismo de Higgs. Este había sido propuesto unos años antes en otro contexto por Robert Brout, François Englert y Peter Higgs, entre otros.

La idea principal resulta muy sencilla de entender. Una manera de reconciliar la masa observada de las partículas con la simetría requerida por las interacciones consiste en postular que dicha simetría existe, pero que no es aparente. Imaginemos que nos encontramos en el centro de una esfera. En tal caso, veríamos lo mismo con independencia de la dirección en la que mirásemos. Sin embargo, si nos desplazásemos hasta su polo superior, solo veríamos una cúpula a nuestros pies. La esfera original (y su simetría) seguiría intacta, pero desde el polo solo podríamos apreciar una parte de la simetría inicial: la asociada a las rotaciones en torno al eje vertical.

Una manera de implementar este mecanismo en las ecuaciones del modelo estándar consiste en postular la existencia de un campo que llene todo el espacio y que, en el vacío, tome un valor distinto de cero (esto último sería el equivalente a «abandonar el centro de la esfera»). Dicho campo es el *campo de Higgs*. Como consecuencia de ese ocultamiento parcial de la simetría inicial, algunas partículas, como los bosones *W* y *Z*, adquieren masa. Pero otras, como los fotones (los transmisores de la fuerza electromagnética) permanecen sin masa, pues están asociadas a la parte de la simetría original que continúa siendo aparente. Es más: la misma existencia del bosón *Z*, descubierto en 1983, constituye una de las predicciones de este esquema. Y las *excitaciones* de ese campo ubicuo que hemos postulado (literalmente, las excitaciones del vacío) se corresponderían con lo que denominamos *partícula de Higgs*.

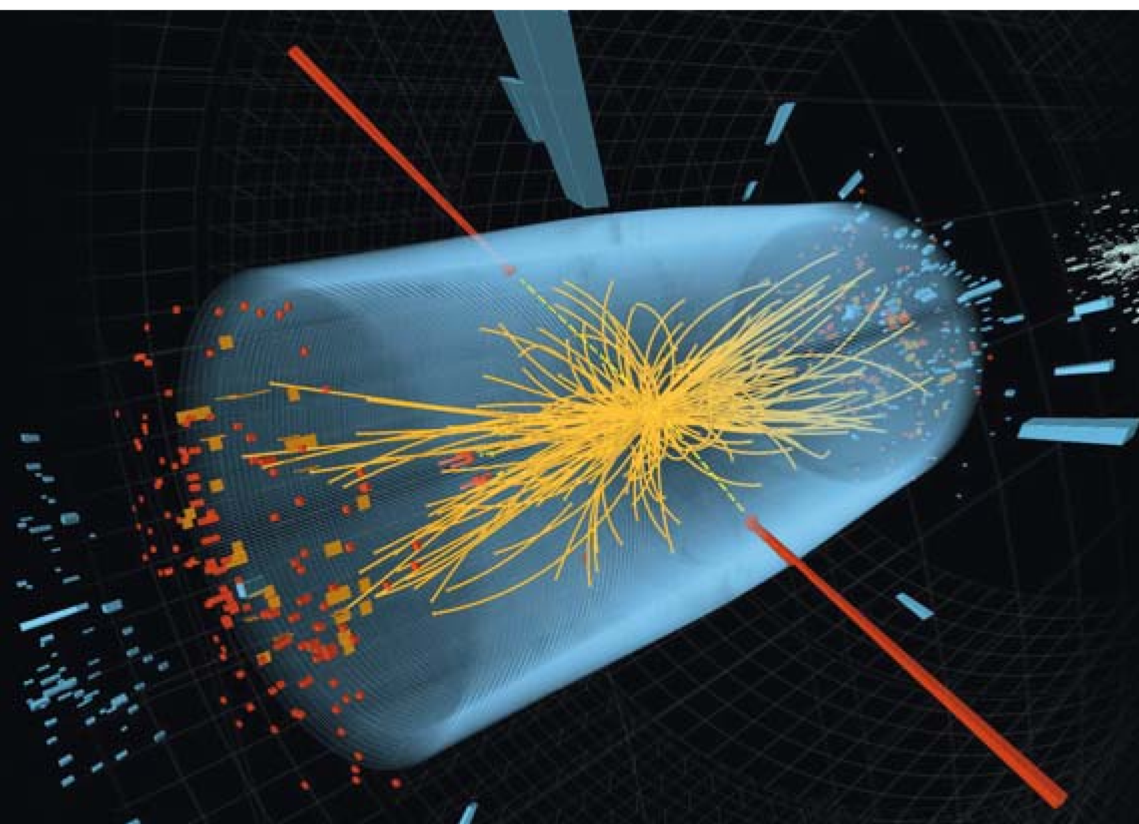
Esta idea implica un gran cambio conceptual, pues requiere que un campo físico llene todo el espacio —algo que, por cierto, recuerda al fracasado éter de hace más de un siglo—. Dicho campo debe, además, satisfacer ciertas propiedades: ha de ser un campo escalar (carente de direccionalidad), lo que implica que las partículas asociadas deben tener espín cero. Toda una novedad.

Además, el campo de Higgs permite explicar la masa de las partículas de materia, como los electrones o los quarks. Dado que toma un valor en el vacío distinto de cero, podemos imaginarlo como un líquido viscoso que llena el universo. Si no existiera, no costaría ningún trabajo desplazar las partículas. Pero, al estar sumergidas en él, todas ellas experimentan una fricción que se opone al movimiento, exactamente como si poseyeran masa. En esta analogía, las partículas de Higgs serían el equivalente a las «olas» que aparecen al agitar un líquido.

Esa «agitación» es la que intenta producir el LHC cuando acelera protones y los hace chocar con una energía de 3500 GeV cada uno (la energía contenida en la masa de un protón es algo inferior a 1 GeV). Sin embargo, generar un número apreciable de partículas de Higgs reviste no poca dificultad. Además, estas se desintegran con gran rapidez, por lo que lo único que cabe detectar son sus productos de desintegración. A partir de ellos, deben deducirse las propiedades de la partícula que los originó.

¿Qué ha visto el LHC?

El modelo estándar, por sí solo, no predice ningún valor concreto para la masa de la partícula de Higgs. Sin embargo, desde hace unos años sabemos que, en caso de existir, su masa debe hallarse entre 114 GeV (el límite experimental impuesto por el LEP, el antecesor del LHC) y unos 800 GeV. A tenor de los resultados



Reconstrucción de uno de los eventos registrados por el detector CMS en el que los expertos creen que podría haberse producido un bosón de Higgs. En él se aprecia la producción de dos fotones de alta energía (*líneas punteadas amarillas; las líneas rojas representan su energía*), una de las formas típicas en las que la partícula de Higgs, de vida efímera, puede acabar desintegrándose. Los expertos intentan aislar este tipo de procesos «delatores» entre la enorme cantidad de partículas de otro tipo (*líneas naranjas*) que se producen en las colisiones entre protones que lleva a cabo el LHC.

CERN

presentados el 13 de diciembre, la mayor parte de ese intervalo ya ha sido excluido con un nivel de confianza superior al 95 por cierto. Solo sobreviven dos «ventanas» de masas posibles, una entre 600 y 800 GeV —muy desfavorecida por otros resultados experimentales— y otra, muy estrecha pero interesantísima, entre 115 y 128 GeV.

Ese arrinconamiento constituye, por sí solo, un éxito de primer orden para el LHC. Que las posibilidades se restrinjan a un intervalo tan diminuto puede parecer sospechoso: como si el Higgs hubiese jugado a esconderse en el último refugio que le quedaba... o como si no existiese, una posibilidad que exigiría un replanteamiento radical de nuestras concepciones sobre la materia.

Sin embargo, esa pequeña ventana aparece como la favorita desde un punto de vista teórico y experimental. Los resultados que en su día obtuvo el LEP ya apuntaban, de manera indirecta, a un Higgs en esa región de masas. Y, desde el punto de vista teórico, los modelos supersimétricos (una propuesta para ampliar el modelo estándar, muy sugerente desde numerosos puntos de vista) predicen, en su versión más simple, un Higgs con una masa en torno a esos valores.

Pero las colaboraciones ATLAS y CMS han obtenido algo más que límites de exclusión: han observado algunos indicios que apuntarían a la existencia de un Higgs cuya masa rondaría los 125 GeV. Para cada valor posible de la masa de la partícula, el modelo estándar nos dice con qué frecuencia el Higgs debería desintegrarse de una u otra manera. Para un Higgs cuya masa se encontrase en el intervalo que los experimentos no logran excluir, las señales más claras provendrían de la desintegración de la partícula en dos fotones o en cuatro leptones (dos pares electrón-positrón o muón-antimuón).

En comparación con lo que deberíamos ver en caso de que el Higgs no existiese, el detector ATLAS observó un exceso de sucesos con dos fotones cuya energía apuntaría a un Higgs de 126 GeV. Sin embargo, la detección de esos sucesos «de más» no demuestra la existencia del Higgs, ya que todo podría deberse a una fluctuación estadística. No obstante, la probabilidad de que el Higgs no exista y, aun así, se observe un exceso similar para algún valor del intervalo de energías plausibles ronda el 7 por ciento. ATLAS detectó también un exceso de sucesos con cuatro leptones. De nuevo, estos apuntaban a un Higgs de unos 126 GeV, algo sin duda esperanzador. La probabilidad combinada de que ambos efectos se deban a una fluctuación se estima inferior al 1 por ciento.

Sin embargo, otras circunstancias invitan a ser precavidos. El exceso de sucesos con dos fotones resulta mayor de lo predicho por el modelo estándar. Además, los resultados obtenidos por CMS se muestran menos claros. Aunque este experimento también detectó más eventos de los previstos (tanto con dos fotones como con cuatro leptones) y con una energía similar a la registrada por ATLAS, el acuerdo no es todo lo perfecto que cabría esperar. Por otro lado, se trata de resultados aún preliminares, y quizá los errores sistemáticos sean mayores de lo estimado.

En cuestión de un mes dispondremos de análisis más completos. Y, con toda probabilidad, hacia finales de año se habrán alcanzado resultados mucho más precisos, puesto que los experimentos habrán medido el cuádruple de colisiones y la fiabilidad de los análisis estadísticos mejorará. Si los indicios se confirman, el LHC habrá realizado un descubrimiento histórico. Permanezcan atentos.

—Alberto Casas
Instituto de Física Teórica
Universidad Autónoma de Madrid/CSIC

FÍSICA

Campos electromagnéticos artificiales

Una nueva técnica permite que los átomos neutros de un condensado de Bose-Einstein se rijan por una dinámica idéntica a la que dicta la fuerza de Lorentz sobre partículas con carga eléctrica

Un procedimiento natural para resolver un problema complejo consiste en estudiar una versión simplificada del mismo, pero que retenga los aspectos esenciales. Para numerosas aplicaciones, semejante papel lo desempeñan los sistemas de átomos ultrafríos, ya que estos carecen de impurezas y sus propiedades pueden modificarse en tiempo real y con un control experimental muy preciso. Las simulaciones cuánticas con átomos ultrafríos permiten abordar numerosas cuestiones de física fundamental que no pueden resolverse de manera analítica.

Sin embargo, los átomos que componen los sistemas ultrafríos carecen de carga eléctrica neta, por lo que su movimiento resulta inmune a la presencia de un campo electromagnético. Ello imposibilita emplearlos en el estudio de fenómenos de gran interés, como la física de un gas de electrones en dos dimensiones sometido a los efectos de un campo magnético. La investigación de tales fenómenos no solo reviste interés en mecánica cuántica básica, sino también en otras áreas, como computación cuántica o teoría de la información.

Durante los últimos años, nuestro grupo del Joint Quantum Institute ha investigado con éxito la posibilidad de recrear las condiciones dinámicas que un

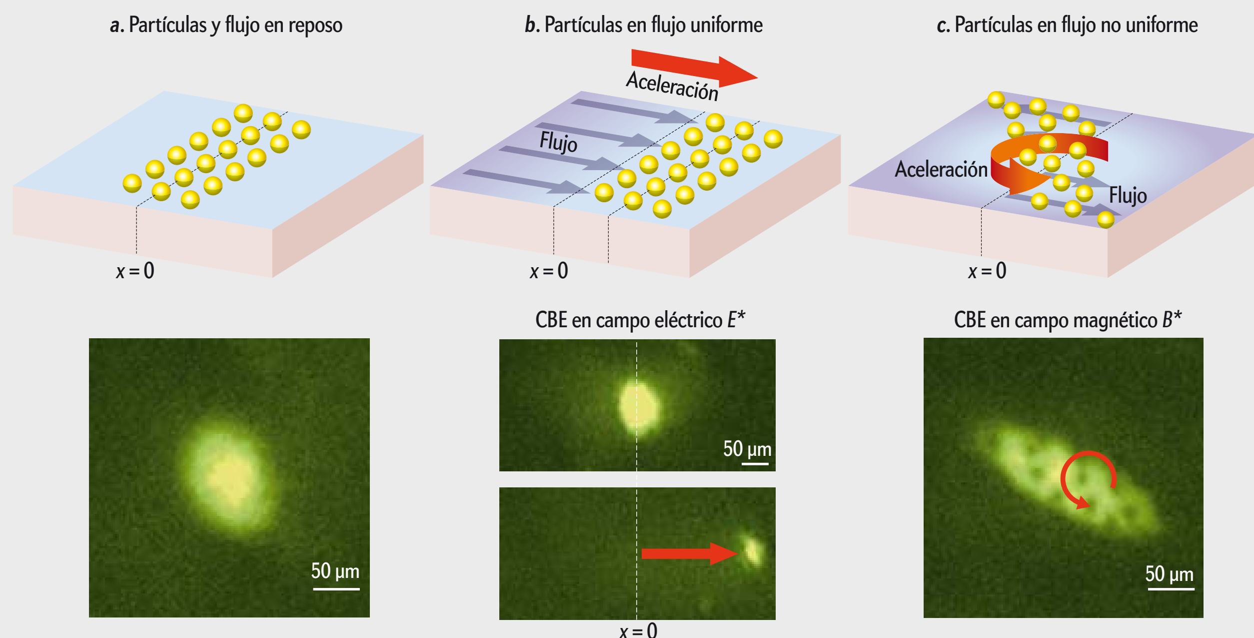
ELECTROMAGNETISMO SIN CARGAS

Un campo eléctrico *E* acelera las partículas cargadas a lo largo de sus líneas de campo, mientras que un campo magnético *B* lo hace en una dirección perpendicular al propio campo y a la de movimiento de la partícula, lo que induce movimientos de rotación. De manera similar a como ocurre con el campo gravitatorio, también *E* y *B* emergen a partir de las variaciones temporales y espaciales de un potencial vectorial subyacente, *A*.

Podemos comparar la dinámica de una carga *q* sometida a los efectos de un potencial electromagnético *A* con la de una partícula sumergida en un fluido. Cuando este se encuentra en reposo (*a, arriba*), el movimiento de la partícula no se ve afectado. Pero si el fluido comienza a desplazarse (es decir, si su posición cambia con el tiempo), la partícula experimenta una aceleración en la dirección de dicho flujo (*b, arriba*), al igual que ocurre con una carga *q* bajo los efectos de un campo eléctrico. Si la partícula se encuentra inmersa en un flujo turbulento (y sometido, por tanto, a variaciones espaciales), experimentará un movimiento de rotación (*c, arriba*), tal y como le sucedería a una carga *q* en presencia de un campo magnético.

Nuestros experimentos han demostrado que dichos efectos pueden implementarse en un condensado de Bose-Einstein (CBE), un estado de la materia en el que todas las partículas se acumulan —o se *condensan*— en el mismo estado cuántico de mínima energía. Mediante el empleo de láseres, puede transferirse momento a los átomos de la muestra. Si el proceso se realiza de la manera adecuada, puede inducirse en ellos una dinámica idéntica a la que experimentaría una partícula de carga q^* en presencia de un potencial vectorial A^*.

Las imágenes inferiores, obtenidas gracias a la técnica de absorción en resonancia, muestran la distribución de densidad de un condensado de Bose-Einstein en varias situaciones: en reposo (*a, abajo*); antes y después de generar un campo eléctrico artificial E^* (*b, abajo*, donde se observa que los átomos se aceleran en la dirección del campo), y tras haber aplicado un campo magnético artificial B^* (*c, abajo*). En este último caso, se observa la aparición de vórtices (*pequeños remolinos*), análogos a los que generaría un campo magnético real sobre un superfluido de partículas con carga eléctrica.



KARINA JIMÉNEZ GARCÍA (*esquema*); DE: «SYNTHETIC MAGNETIC FIELDS FOR ULTRACOLD NEUTRAL ATOMS», POR Y.-J. YIN ET AL. EN *NATURE* VOL. 462, PÁGS. 628-632, DICIEMBRE DE 2009 Y «A SYNTHETIC ELECTRIC FORCE ACTING ON NEUTRAL ATOMS», POR Y.-J. YIN ET AL. EN *NATURE PHYSICS* VOL. 7, PÁGS. 531-534, MARZO DE 2011 (*imágenes de absorción en resonancia*)

campo electromagnético ejerce sobre partículas con carga eléctrica, empleando para ello condensados de Bose-Einstein. Nuestros trabajos, publicados en *Nature* en diciembre de 2009 y en *Nature Physics* en marzo de 2011, han demostrado que resulta posible inducir en los átomos neutros de la muestra una dinámica idéntica a la de una partícula de prueba (la idealización de una partícula que experimenta los efectos de un campo externo, pero que no genera el suyo propio) inmersa en un campo electromagnético.

Campos gauge sintéticos

La fuerza de Lorentz describe la dinámica de una partícula de carga eléctrica q sometida a los efectos de un campo eléctrico E y un campo magnético B. Al igual que ocurre con la fuerza que experimenta un cuerpo en un campo gravitatorio, también el campo electromagnético puede derivarse a partir de un potencial subyacente. En particular, E y B aparecen como consecuencia de las variaciones (temporales y espaciales, respectivamente) de cierto potencial vectorial A. En la formulación moderna de la teoría electromagnética, esta cantidad representa tres de las cuatro componentes del campo gauge correspondiente, la variable que se emplea para describir los grados de libertad fundamentales del campo.

En nuestro montaje experimental, un condensado de Bose-Einstein de átomos de rubidio 87 se ilumina con un par de láseres a fin de que estos transfieran momento a los átomos de la muestra. El paralelismo con el caso electromagnético se debe a que, cuando una partícula de carga q se encuentra inmersa en un potencial vectorial A, su dinámica puede reescribirse de manera formalmente análoga a la de una partícula «libre» cuyo momento canónico se ve modificado en una cantidad dada por el producto qA. La clave de nuestro resultado se debe a que el momento transferido por los láseres a los átomos de la muestra puede ajustarse en tiempo real para que imite dicho efecto.

Como resultado, el comportamiento de cada uno de los átomos resulta indistinguible del que experimentaría una partícula de carga ficticia q^* que se hallase inmersa en un potencial A^* (o, de manera equivalente, en un campo electromagnético dado por los correspondientes E^* y B^*). Hemos de destacar que la cantidad física bien definida en nuestro experimento es el producto q^*A^* (ni q^* ni A^* están definidos por separado). Dicho producto, con unidades de momento, depende de la intensidad de los láseres y de la diferencia entre su energía y la de los niveles energéticos internos de los átomos del condensado.

La realización experimental de campos electromagnéticos artificiales ha ampliado el horizonte de la simulación cuántica con átomos ultrafríos, pues permite implementar fenómenos físicos que hasta el momento eran exclusivos de los sistemas electrónicos. En particular, esperamos que los campos electromagnéticos artificiales desempeñen un papel relevante en el estudio del efecto Hall cuántico con átomos ultrafríos. Otras aplicaciones de interés incluyen la generalización de estos métodos a campos gauge no abelianos y la realización de aislantes topológicos, o el desarrollo de técnicas similares con átomos fermiónicos (aquellos de espín semientero).

—Karina Jiménez García
Instituto Joint Quantum
NIST y U. de Maryland, EE.UU.
y CINVESTAV, México

INGENIERÍA

Células solares biomiméticas

Estructuras que remedan los ojos de los insectos permiten mejorar la eficiencia de las células solares fotovoltaicas

¿Alguna vez ha intentado atrapar una mosca? A menos que tenga la agilidad de Bruce Lee o que el aire sea frío y húmedo, es probable que no haya tenido éxito. La ubicación y la estructura de los ojos de una mosca, así como la de muchos otros insectos, le proporcionan un campo angular de visión amplio, mucho más amplio que el de los humanos.

Es precisamente ese gran campo angular de visión el que nos inspiró para concebir y examinar estructuras que mejoraran la eficiencia de la conversión de luz solar en corriente eléctrica que tiene lugar en las células solares fotovoltaicas. Un reto de sumo interés en la actualidad, puesto que nunca antes ha existido una mayor demanda de fuentes no contaminantes de energía.

A pesar de la notable evolución que ha experimentado la tecnología fotovoltaica durante los últimos decenios, las células solares de silicio siguen presentando una eficiencia escasa y un costo demasiado elevado para que sean adoptadas de forma generalizada. Para aumentar su rendimiento debería minimizarse la reflexión de luz solar que tiene lugar en la superficie expuesta de las mismas. Por lo general, este objetivo puede lograrse mediante el recubrimiento de la superficie con materiales antirreflectantes, compuestos por una o dos capas muy delgadas de materiales con las propiedades ópticas adecuadas. Adicionalmente, la superficie de la célula solar puede ser texturizada con el fin de atrapar los rayos de luz por reflexión múltiple.

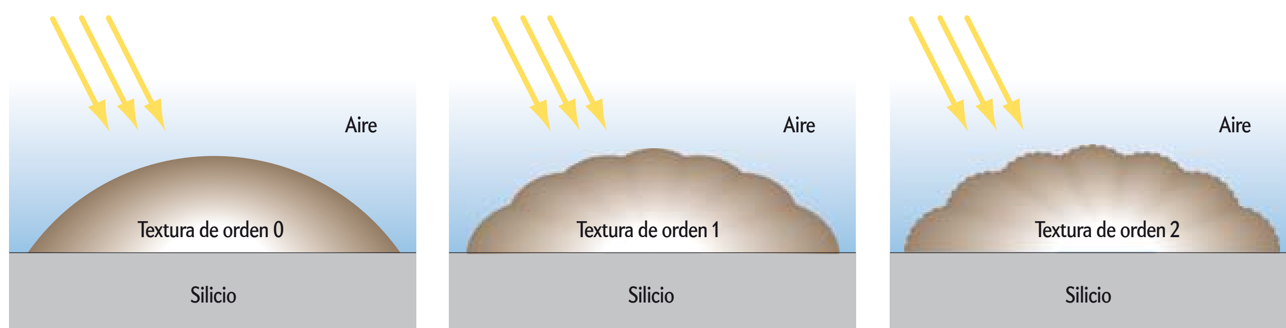
Ingeniería biomimética

En fecha reciente, junto con Antonio Scaglione, de la Universidad de Salerno, Vincenzo Fiumara, de la Universidad de Basilicata, y Carlo G. Pantano y Drew P. Pulsifer, de la Universidad estatal de Pensilvania, hemos acometido la aplicación de ideas procedentes de la ingeniería biomimética, que extrae de la naturaleza soluciones para el diseño de nuevas estructuras y dispositivos, al desarrollo de las células solares.

La naturaleza sugiere estrategias de gran utilidad para optimizar la eficiencia de esos dispositivos. A lo largo de miles de años, la selección natural ha dado lugar a especies dotadas de estructuras que permiten la captura de la luz desde múltiples direcciones: la mosca doméstica posee grandes ojos y puede ver 270 grados en el plano horizontal que la rodea.

Los ojos compuestos de los insectos contienen varias unidades sensoriales, los omatidios, dispuestos sobre una superficie curva. El diámetro transversal de un omatidio es de unos 20 micrómetros. Aunque la resolución espacial de la imagen formada en el cerebro es limitada, el campo de visión es muy amplio. Para aumentar la eficiencia de las células solares puede utilizarse este gran campo angular de visión, de modo que se aproveche al máximo la luz incidente.

En ese contexto, hemos desarrollado un programa de investigación con el propósito de convertir la superficie exterior de las células solares en estructuras bio-



Para simular la interacción de la luz (*flechas*) con la frontera entre el aire y el silicio, se desarrolló una matriz bidimensional de prismas paralelos. Cada prisma corresponde al arco de un círculo, decorado por arcos de círculos más pequeños. El grado de «decoración» define el orden de la textura.

miméticas que maximicen la recolección de luz incidente. El objetivo fundamental es adaptar la compleja superficie exterior de los ojos compuestos de diversos insectos a la superficie de células solares. Dicho proyecto se ha dividido en dos fases que se están llevando a cabo de forma simultánea.

Simulaciones numéricas

En la primera fase de nuestro proyecto de investigación hemos realizado simulaciones numéricas de la interacción de la luz con la frontera entre el aire y el silicio. Comenzamos los cálculos a partir de un modelo bidimensional bioinspirado. Se consideró que la superficie estaba compuesta por una matriz de prismas paralelos de una longitud decenas de miles de veces mayor que la longitud de onda típica de la radiación solar. Por encima del plano de la base, la sección transversal de cada prisma corresponde al arco de un círculo (definido como textura de orden cero), decorado por arcos de círculos más pequeños (textura de orden uno). También se consideraron texturas de orden superior.

Los resultados de las simulaciones, publicados en *Bioinspiration & Biomimetics* en junio de 2010 y marzo de 2011, indican que el recubrimiento de una célula solar con estructuras biomiméticas mejora la capacidad de colección de luz solar.

Técnica Nano4Bio

La segunda fase de nuestro proyecto de investigación, publicada en *Bioinspiration & Biomimetics* en septiembre de 2010, consiste en la replicación, a escala nanométrica, de la superficie de ojos compuestos de diversos insectos. Las dimensiones características de la morfología de un ojo compuesto van desde unos 200 nanómetros a pocos milímetros. La fabricación de estas estructuras constituye un proceso tedioso, siendo además necesario un equipo refinado y costoso.

En nuestra aproximación hemos utilizado ojos compuestos reales, a modo de «biopatrones». Hemos desarrollado un proceso híbrido de nanofabricación en cuatro pasos, denominado Nano4Bio, que permite la fabricación de múltiples réplicas de alta fidelidad. Este proceso se basa en la combinación de técnicas de deposición en alto vacío, electroplateado y estampado a escala nanométrica.



Imágenes obtenidas con un microscopio electrónico de barrido de la córnea de una mosca califórea (*izquierda*) y de una réplica polimérica (*derecha*) producida mediante la técnica Nano4Bio.

En la primera etapa, se dirige un vapor colimado de níquel en un entorno de alto vacío hacia el «biopatrón» (córnea de insecto), montado en una plataforma que permite una rotación rápida y oscilación simultáneas. A los pocos minutos, se deposita sobre el «biopatrón» una película de 250 nanómetros de espesor.

En el segundo paso, una capa de níquel de unas 60 micras de espesor es electroformada sobre la película crecida en alto vacío para conferirle la integridad estructural necesaria para los pasos siguientes.

Se elimina luego el «biopatrón» original mediante incineración por procesado de plasma. Lo que queda corresponde a un molde de níquel que puede utilizarse a modo de matriz para el estampado, o como un molde para la creación de múltiples réplicas.

El cuarto paso de la técnica Nano4Bio nos ha permitido obtener réplicas del «biopatrón» original con una fidelidad en la escala de unas 2 micras. Una gran ventaja de esta técnica reside en la posibilidad de producir réplicas de forma simultánea de múltiples «biopatrones» de gran complejidad morfológica.

En resumen, hemos tomado la ruta de la biorreplicación en nuestra búsqueda de una mejora del rendimiento de células solares. En el futuro, esperamos explorar la utilización de diversos materiales semiconductores y polímeros. La biorreplicación resulta muy adecuada para la fabricación de células solares flexibles hechas de materiales blandos y se adapta también a la dura superficie de silicio.

—Raúl J. Martín-Palma
Departamento de física aplicada
Universidad Autónoma de Madrid
Francesco Chiadini
Departamento de ingeniería de la información y eléctrica
Universidad de Salerno
Akhlesh Lakhtakia
Departamento de ingeniería y mecánica
Universidad estatal de Pensilvania

NEUROCIENCIA

Un pez muy cerebral

Un pez eléctrico del Congo podría ofrecer la clave para entender cómo nos movemos

Durante decenios, los neurólogos han ido desarrollando teorías sobre el funcionamiento del cerebro, a pesar de una carencia casi total de datos sobre las neuronas más numerosas: las células granulosas del cerebelo. En el cerebro humano hay unos setenta mil millones de neuronas de este tipo, de un total de ochenta y seis mil millones. Estas células relativamente simples se encuentran en el cerebelo, una estructura con forma de brócoli situada bajo la parte posterior de nuestro cerebro. Las células granulosas del cerebelo forman parte de un circuito cerebral con una estructura de una regularidad notable, casi cristalina.

Sin embargo, no se ha descubierto la finalidad de esa disposición anatómica tan sencilla. En la década de los sesenta del siglo pasado, un equipo de neurólogos, informáticos y matemáticos sugirieron que esas células podrían desempeñar una función importante en la capacidad del cerebro de adquirir habilidades motrices. Varios grupos de investigadores se dispusieron a comprobar esa teoría con la idea de que, en poco tiempo, nuestra comprensión del cerebro daría un enorme paso hacia delante. Desgraciadamente, reunir datos sobre las células granulosas resultó bastante más difícil de lo que se pensaba. El hecho de hallarse densamente agrupadas, poseer un tamaño muy reducido y ubicarse a cierta profundidad en el cerebro dificulta su estudio mediante las técnicas experimentales tradicionales. La teoría no se ha podido verificar en cuarenta años, lo que ha contribuido a ensombrecer los esfuerzos de los investigadores.

Hace poco se ha abierto un camino que tal vez aporte nuevos datos: el estudio del pez eléctrico *Gnathonemus petersii*, un animal curioso que lleva tiempo fascinando a los neurólogos por su enorme cerebelo. Nate Sawtell, neurólogo del Instituto Kavli de Ciencias del Cerebro de la Universidad de Columbia, donde estoy realizando el doctorado, ha registrado con detalle la actividad de células granulosas individuales con microelectrodos en un pez eléctrico vivo. Ha descubierto algunos de los primeros indicios directos que apoyan la teoría de los años sesenta, que proponía que las células granulosas aumentarían la capacidad del cerebelo para aprender a realizar movimientos precisos. Sawtell ha demostrado que las neuronas que reciben información de estas células predicen la posición de la cola del pez, a partir de una combinación de señales motrices y sensoriales, un paso crucial en el aprendizaje de habilidades motrices. Los resultados de Sawtell, uno de los pocos neurólogos que trabajan con este pez, apuntan a las grandes posibilidades que ofrece la especie para esclarecer un misterio no resuelto durante décadas.

Un conocimiento más hondo de la función de las células granulosas cerebrales podría llevar a otros descubrimientos importantes. En los humanos, las amplias conexiones del cerebelo con el resto del cerebro sugieren que no solo se especializa en el aprendizaje de las habilidades motrices. También interviene en la percepción y en la cognición. Asimismo, algunos estudios recientes vinculan las disfunciones del cerebelo con dolencias tan complejas como la esquizofrenia y el autismo. Es hora de escuchar a esa mayoría silenciosa de setenta mil millones de neuronas, lo que ya se ha empezando a hacer gracias a un pequeño pez eléctrico con un cerebelo voluminoso.

—*Tim Requarth*



JOHN P. SULLIVAN, UNIVERSIDAD CORNELL

ECOLOGÍA

Control biológico de la procesionaria

Las superpoblaciones de este insecto pueden prevenirse mediante la diversificación de los pinares y el refuerzo de las poblaciones de sus predadores naturales

La procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), lepidóptero típico de la región mediterránea, es uno de los principales defoliadores de los pinos en el sur de Europa y norte de África. Sus larvas construyen los nidos de seda, los bolsones, en lo alto de las ramas de los pinos y se alimentan de las acículas de los árboles desde el otoño hasta la primavera. Cuando la procesionaria causa un daño muy localizado, se puede combatir de diferentes formas: podando las ramas que tienen bolsones, disparando a los bolsones con escopetas de perdigones, o mediante la pulverización local de insecticidas químicos (como el difluorbenzurón) o biológicos (principalmente, derivados de la bacteria *Bacillus thuringiensis*).

Cuando se produce una superpoblación, la procesionaria llega a cubrir grandes extensiones, con lo que los tratamientos de alcance local resultan insuficientes. En este caso, la técnica más frecuente para combatir la plaga consiste en realizar pulverizaciones aéreas con insecticidas. La decisión de si un rodal necesita ser tratado o no depende de una evaluación visual que hacen los técnicos o guardas forestales a finales del invierno, cuando la oruga ya ha defoliado gran parte del pinar y se encuentra en un estado de desarrollo avanzado. Sin embargo, la pulverización de los rodales no se lleva a cabo hasta principios del otoño siguiente, cuando eclosionan los huevos y comienza el siguiente ciclo, ya que los tratamientos (químicos y biológicos) funcionan con mayor eficacia cuando la oruga se halla en sus primeras fases de desarrollo.

Control natural de las superpoblaciones

¿Y qué ocurre si no se pulverizan las masas forestales con insecticidas? Cuando se produce una superpoblación, la procesionaria causa una defoliación intensa de los pinos, lo que disminuye la cantidad de recursos disponibles para las orugas del año si-

---

MEJOR PREVENIR QUE CURAR

Para hacer frente a la procesionaria resulta imprescindible tener en cuenta su ciclo biológico. Los tratamientos tradicionales de fumigación resultan poco eficaces, ya que suelen realizarse en los momentos de plena explosión demográfica de la especie, cuando el mayor daño está hecho. Se recomienda, por tanto, aplicar medidas biológicas preventivas que eviten el crecimiento de superpoblaciones del lepidóptero.

CICLO VITAL Y EFECTOS EN EL BOSQUE

REFUGIO CONTRA EL FRÍO INVERNAL

Las larvas de procesionaria construyen sus nidos en lo alto de las ramas de los pinos y pasan el invierno en ellos, desde donde salen a comer durante la noche.



ENTERRAMIENTOS EN PROCESIÓN

Al final del invierno, las orugas descienden al suelo, donde forman las características filas indias, y se entierran en él, donde se transforman en crisálida. En verano, las crisálidas eclosionan y surgen las mariposas, que se aparean y ovopositan sobre las acículas de los pinos. Los huevos eclosionarán 30 o 40 días después y el ciclo se reiniciará.



LOS PINOS RESPONDEN

Cuando se produce una superpoblación, las orugas causan una defoliación intensa, lo que disminuye la cantidad y calidad del alimento disponible para el año siguiente.

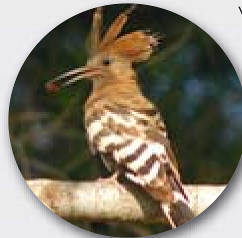


MEDIDAS BIOLÓGICAS PREVENTIVAS



FAVORECER LA PRESENCIA DE DEPREDADORES

Ciertas aves insectívoras han desarrollado estrategias adaptativas que les permiten alimentarse de la procesionaria en distintos estadios de su ciclo biológico. El críalo (*Clamator glandorius, arriba*) se alimenta de la larva durante la primavera, gracias a un mecanismo de regurgitación que le permite expulsar los pelos urticantes. La abubilla (*Upupa epops, abajo*) utiliza su largo pico para desenterrar las crisálidas, que constituyen una parte importante de su dieta.





AUMENTAR LA DIVERSIDAD DE PINARES

La existencia de otras especies leñosas ofrece obstáculos a la puesta de la procesionaria, a la vez que favorece la presencia de sus depredadores.

ILUSTRACIONES CORTESÍA DE JOSÉ ANTONIO HÓDAR Y ALBERTO GARCÍA

guiente, no solo en cantidad sino en calidad. De un año para otro apenas quedan acículas, y las nuevas que brotan presentan peores propiedades alimentarias. Como consecuencia, se producen mortalidades masivas de larvas y se reduce drásticamente la población.

Por otro lado, cuando se registra una explosión demográfica de la procesionaria, también se incrementa el número de sus depredadores, fundamentalmente parasitoides y aves insectívoras. Debido a la toxicidad de los pelos de la oruga, no hay muchas aves que se alimenten de ella. Solo unas pocas especies, como el críalo (*Clamator glandorius*), el cuco (*Cuculus canorus*), la abubilla (*Upupa epops*), el chotacabra gris (*Caprimulgus europaeus*), el carbonero común (*Parus major*), el carbonero garrapinos (*Periparus ater*) o el herrerillo capuchino (*Lophophanes cristatus*), han desarrollado estrategias adaptativas que les permiten alimentarse de la procesionaria en distintos estadios de su ciclo biológico.

Hacia una gestión más eficiente

La pulverización aérea de insecticidas como medida preventiva resulta imposible, ya que no hay forma de predecir con exactitud los rodales de bosque que van a sufrir un alto grado de infestación. Pulverizar todos los rodales exigiría invertir una gran cantidad de recursos económicos y, además, favorecería la aparición a medio o largo plazo de resistencias al tratamiento.

Por otro lado, las superpoblaciones solo pueden detectarse una vez que ya han sucedido. Pero los tratamientos resultan ineficaces en plena explosión demográfica, por lo que solo podrían aplicarse a la generación siguiente, cuando gran parte del daño ya estaría hecho.

Con tales limitaciones, las pulverizaciones aéreas acaban teniendo efectos semejantes (en términos de disminución de las poblaciones por debajo de los niveles de riesgo) a los que ejercen el control natural de las superpoblaciones de procesionaria, esto es, por el agotamiento de los recursos alimentarios y el aumento de los depredadores. Así lo demostró nuestro grupo en un artículo publicado en junio de 2011 en *Forest Ecology and Management*.

La pulverización aérea, por tanto, no debería realizarse como medida de control de las superpoblaciones de la oruga. En todo caso, los controles no biológicos deberían restringirse a aquellas situaciones que supongan una amenaza para la salud, como plagas en áreas recreativas, o en las que se realicen labores forestales durante el invierno, como es el caso de los trabajadores de la piña o de la madera. En la mayoría de las ocasiones, resulta más aconsejable primar las medidas preventivas sobre las paliativas. A tal fin, se recomienda incrementar la heterogeneidad espacial y la diversidad de otras especies leñosas en los pinares de repoblación (en especial en las lindes de los rodales, donde la procesionaria ataca con mayor virulencia) y favorecer las poblaciones de aves que se alimentan de este insecto mediante la colocación de cajas nido.

En definitiva, las medidas de control de la procesionaria deben incluir la gestión de los pinares, con la finalidad de disminuir la densidad de plantas hospedadoras del insecto y de incrementar la diversidad de otras especies leñosas. Estas últimas hacen las veces de barreras físicas y químicas para la localización de los pinos en el momento de la puesta del insecto, y de refugios para depredadores que, en última instancia, ejercen de controladores naturales de la oruga.

—Luis Cayuela
Depto. de biología y geología
Universidad Rey Juan Carlos, Madrid
José Antonio Hódar
y Regino Zamora
Depto. de ecología
Universidad de Granada



INNOVACIÓN

Ideas que cambian el mundo

Nuevas técnicas que podrían tener una influencia decisiva

Las revoluciones son, a menudo, fruto de las ideas más sencillas. Cuando el joven inventor Steve Jobs se propuso acercar la informática a personas sin experiencia con ordenadores, ni especial interés en adquirirla, nos llevó desde el engorroso sistema de los procesadores centrales e instrucciones por línea de comandos hasta la novedad y frescura del Macintosh y el iPhone. Las ideas de Jobs han contribuido a cambiar para siempre nuestra relación con la tecnología.

¿Qué otras ideas, elementales pero revolucionarias, se esconden aún en los laboratorios, esperando el momento oportuno para brotar con fuerza? En las páginas siguientes describimos algunas de ellas. Sirva esta colección de bienvenida al poder de las ideas sencillas.

FOTOGRAFÍAS DE DAN SAELINGER

MEDICINA

Supervisor de salud

Un teléfono inteligente podría explorar nuestras constantes vitales en todo momento y alertarnos de cualquier anomalía

Casi todo el mundo acude al médico si experimenta dolor torácico o si descubre un bulto sospechoso. Pero cuando aparecen este tipo de signos ya suele ser demasiado tarde. La detección precoz de síntomas exige una supervisión continua, tarea que podría realizar un teléfono móvil. Un sistema de exploración que aprovechase el continuo flujo de datos de los teléfonos móviles contribuiría a eliminar el peligroso hiato que media entre la manifestación sintomática y el diagnóstico. Asimismo, los dispositivos móviles ayudarían a los profesionales sanitarios a identificar y tratar las dolencias antes de que se tornasen demasiado graves, y onerosas, para atenderlas con eficacia. En teoría, tales sistemas de alerta permanente recortarían el 75 por ciento de los gastos asociados al tratamiento de las enfermedades crónicas. También prolongarían la vida de los pacientes, al atajar a tiempo millones de situaciones potencialmente críticas.

La mayoría de las aplicaciones para la salud que existen en el mercado de los móviles apenas son más que meros reclamos; pero entre ellas sobresalen dos o tres que podrían ayudar a los usuarios a gestionar enfermedades crónicas o identificar síntomas graves. El electrocardiógrafo (ECG) para iPhone de AliveCor consiste en una funda de plástico, provista en el dorso de dos electrodos metálicos, que registra el ritmo cardíaco del usuario cuando sostiene el aparato con ambas manos o se lo aplica sobre el pecho. Los datos cardioeléctricos «en tiempo real» se envían por vía inalámbrica a los pacientes, a sus familiares y a sus médicos, a quienes alertan de posibles arritmias. «No solo proporciona un pronto aviso, sino que lo hace sin el coste que conlleva el ECG estándar», afirma David Albert, el ingeniero biomédico que ha desarrollado el aparato. Análogamente, la compañía francesa Whitings ha creado un dispositivo que funciona con el iPhone para medir la tensión arterial. A los 30 segundos de colocarse el usuario su esbelto manguito blanco, saltan los valores en la pantalla del teléfono; si son anómalos, emite también una señal de aviso. Y la aplicación Diabetes Manager de WellDoc para el control de la diabetes, aprobada por la Dirección Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU., permite a los enfermos introducir en su móvil varios datos en tiempo real, como las concentraciones hemáticas de glucosa, los carbohidratos consumidos y los medicamentos tomados. El programa analiza esa información y ofrece al enfermo una recomendación («inyéctese insulina», «coma algo») para mantener su glucosa dentro de unos límites saludables. Según un ensayo clínico publicado en septiembre pasado, los usuarios de Diabetes Manager muestran un mejor control de la glucosa a largo plazo que los no usuarios.

Por el momento, esos nuevos sistemas operan por separado, y muchos de ellos se hallan aún en desarrollo. No obstante, los expertos en salud inalámbrica consideran que constituyen el amanecer de una era en la que los sistemas móviles de supervisión médica funcionarán a coro y sin rupturas, y proporcionarán a los usuarios y a sus médicos una imagen conjunta de su salud. «Desde un punto de vista técnico, es posible pulsar una tecla del teléfono y ordenar: “Deseo conocer mis constantes vitales en tiempo real”», asegura Eric Topol, director del Instituto Scripps de Ciencia Traslacional.



Mediciones sobre la marcha: El electrocardiógrafo para iPhone de AliveCor informa de los ritmos cardíacos.

El gran obstáculo se halla en los sensores. Los monitores de glucosa tradicionales no pueden actuar sin perforar la piel, y pocas personas están dispuestas a ir a todas partes con el manguito de un esfigmomanómetro o con electrodos adheridos a la piel. Pero la aparición de alternativas menos incómodas resulta inminente. Hace poco se han creado en Japón unas fibras fluorescentes inyectables que supervisan la glucosa en sangre. Topol afirma que en el futuro una batería de sensores basados en nanopartículas, que actuarán de interfaz para teléfonos inteligentes, posibilitará una inspección más fiable de las constantes vitales. Y lo que es más interesante todavía, permitirán la detección precoz de marcadores moleculares de enfermedad, como ciertos anticuerpos. De este modo, los sensores que identificaran «marcadores tumorales» podrían enviar un aviso inmediato a los dispositivos móviles, lo que ofrecería a los pacientes la oportunidad de comenzar con quimioterapia antes de que las células cancerígenas pudieran atrincherarse. Además, cuanto más sencilla resulte la supervisión móvil de la salud, más probable será su contratación. Una encuesta realizada en 2010 indicaba que un 40 por ciento de los estadounidenses estaría dispuesto a pagar una suscripción mensual para un dispositivo móvil que informara a sus médicos sobre su tensión arterial, glucosa en sangre o ritmo cardíaco.

Paul Sonnier, vicepresidente de Wireless-Life Sciences Alliance, señala que la corrección temprana de los problemas de salud resultará más fácil todavía cuando la supervisión se integre con el análisis genético. Si una persona es portadora de un gen que la predispone a la diabetes o al cáncer en los primeros años de vida, se le podría colocar un sensor poco molesto que comunicase a su teléfono móvil eventuales anomalías. «Podría injertársele un sensor para anticiparse al primer ataque contra las células de los islotes del páncreas, el primer tipo de célula cancerosa en presentarse», explica Topol. Si los sistemas móviles de supervisión médica alcanzaran todo su potencial, servirían de centinelas omnipresentes y nos protegerían antes incluso de que nos supiéramos en peligro.

—Elizabeth Svoboda

CORTESÍA DE ALIVECOR (*iPhone*); ESTILISMO DE OBJETOS LAURIE RAAB, HALLEY RESOURCES; MAKOTO AOKI, SWELL NYC (*circuito cerebral*); ARREGLOS Y EFECTOS ESPECIALES: JANE CHOI, STOCKLAND MARTEL



INFORMÁTICA

Un chip que piensa como un cerebro

Las computadoras neuronales resolverán tareas que las máquinas normales no pueden realizar

DHARMENDRA S. MODHA tal vez es el único arquitecto de microcircuitos en todo el planeta que integra en su equipo a un psiquiatra, y no para conservar cuerdos a sus ingenieros. Sus colaboradores, un consorcio de cinco universidades y otros tantos laboratorios de IBM, están trabajando en un microchip inspirado en las neuronas.

Han denominado a la técnica «computación cognitiva», y sus primeros productos, dos microchips integrados cada uno por 256 neuronas artificiales, fueron dados a conocer en agosto pasado. Hasta ahora, lo más que hacen es vencer a los visitantes en el juego del Pong o avanzar en un laberinto sencillo. Su objetivo final, no obstante, es muy ambicioso: confinar en un dado de silicio la capacidad computacional del cerebro humano. El programa, SyNAPSE, financiado por la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa estadounidense, está construyendo un microprocesador con 10.000 millones de neuronas y 100 billones de sinapsis, lo que equivale en escala a un hemisferio cerebral humano. Se confía en que su volumen no pase de dos litros y que su consumo sea de 1 kilovatio.

Modha insiste en que, a pesar de las apariencias, no se trata de crear un cerebro. Su equipo intenta desarrollar una arquitectura distinta a la que presentan casi todos los ordenadores desde su invención. Los chips ordinarios hacen pasar sus instrucciones y datos a través de un canal único y estrecho, lo que limita su velocidad máxima. En la invención de Modha, cada neurona artificial contará con un canal propio. Se reunirá así una colosal capacidad de procesamiento en paralelo desde el principio. «Estamos construyendo un sustrato universal, una tecnología de plataforma, apta para un extenso repertorio de aplicaciones», explica Modha.

De tener éxito, la metodología señalará la culminación de 30 años de trabajo en la simulación de redes neuronales, según Don Edwards, neurocientífico de la Universidad estatal de Georgia. Hasta los competidores de IBM están impresionados. «El procesamiento neuromórfico ofrece la posibilidad de resolver problemas difíciles de abordar mediante sistemas de diseño tradicional», explica Barry Bolding, vicepresidente de Cary, con sede en Seattle.

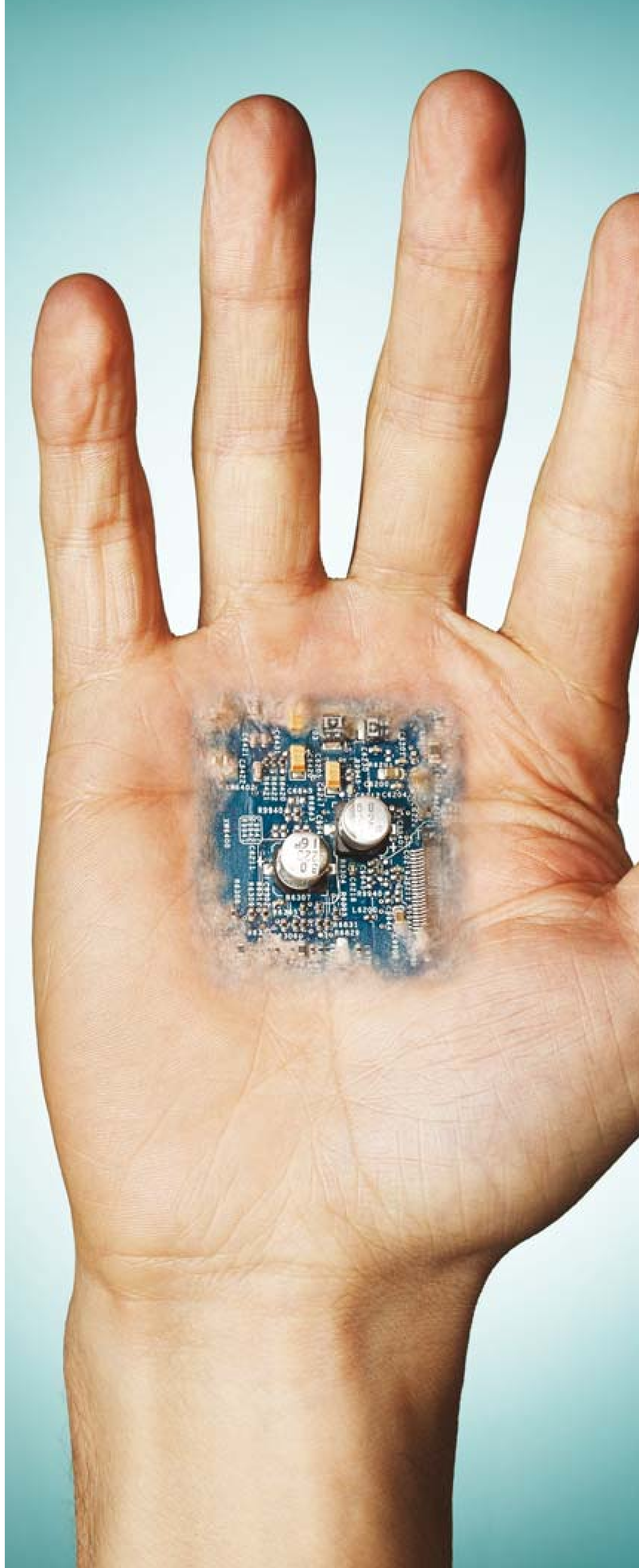
Modha hace hincapié en que las arquitecturas de computación cognitiva no van a reemplazar a los ordenadores actuales, sino a complementarlos. Procesarán la información obtenida del ruidoso mundo real y la transformarán en símbolos inteligibles para los ordenadores clásicos. El chip de Modha se especializaría así en el reconocimiento de configuraciones, como distinguir un rostro en una multitud. Identificada la persona, se enviarían sus datos a un ordenador normal. Sin embargo, estos microcircuitos serán poco aptos para cálculos matemáticos. «Igual que resulta difícil representar un cerebro mediante los ordenadores actuales, también lo es plasmar en una red cerebromorfa la extraordinaria rapidez de los ordenadores actuales para realizar sumas y restas. Uno no puede reemplazar al otro», asegura Modha.

—*Christopher Mims*

DINERO

Billeteras en la piel

Adiós a los pagos por teléfono. Para admitir un cargo, agite la mano



CUANDO LOS ESTUDIANTES de las escuelas del condado de Pinella, cargadas sus bandejas en el autoservicio de la cafetería, se dirigen a las cajas registradoras, les basta saludar con la mano para seguir avanzando y almorzar con sus amigos. Las escuelas de este condado de Florida han instalado en las registradoras unos sensores biométricos, de unos 2,5 cm de lado, que identifican a cada alumno por la configuración de las venas palmarias. Para abonar la comida no se requieren ni tarjetas ni dinero. El único portamonedas necesario es la mano.

El sistema PalmSecure de Fujitsu empleado permite que la cola de estos jóvenes avance con rapidez (los tiempos de espera se han reducido a la mitad desde su introducción), un aspecto importante en escuelas donde el descanso del almuerzo es de solo 30 minutos. Carolinas Healthcare System, organización que gestiona más de 30 hospitales, se vale del mismo método para identificar 1,8 millones de pacientes, hállense estos conscientes o no. La técnica se utiliza también con funciones de certificación redundante de transacciones en el Bank of Tokyo-Mitsubishi UFJ.

Numerosos rasgos físicos permitirían identificar a un individuo mediante máquinas, pero solo unos cuantos poseen la singularidad y accesibilidad suficientes como para poder sacar provecho de ellos. Ni los rostros ni las huellas dactilares son tan unívocos como se nos ha hecho creer, por lo que pueden provocar falsos positivos. Además, se falsifican con facilidad. El iris de los ojos sí constituye un rasgo distintivo, pero para captarlo la persona debe dirigir la vista a un dispositivo de lectura y mirarlo fijamente, sin pestañear, durante varios segundos, lo que a menudo no funciona y, además, resulta incómodo. La configuración tridimensional de las venas de la mano varía mucho de una persona a otra y es de fácil lectura con luz inocua del infrarrojo cercano. Así pues, ¿por qué seguimos pagando con tarjetas de crédito?

El único obstáculo frente a esta «billetera digital» lo constituyen los bancos y las empresas de tecnología, que se muestran renuentes a adoptarla, explica Bruce Schneier, gurú de la seguridad informática. «Una tarjeta de crédito no es más que una llave que permite entrar en una base de datos», argumenta. «Posee una forma rectangular muy cómoda, pero no tiene que ser por fuerza así. Las barreras para el acceso con ella no están enfocadas hacia la seguridad, pues en este caso la seguridad representa una consideración secundaria.»

Si una gran compañía o un organismo gubernamental pusiera en práctica un sistema tal —imagínese poder entrar en el metro con solo enseñar la mano—, probablemente se tornaría ubicuo. Las empresas financieras todavía sufren importantes fraudes y falsos positivos, y la adopción de sistemas biométricos quizá no alivie esa carga. Pero sí hará que comprar resulte tan fácil como agitar la mano.

—*Christopher Mims*

INFORMÁTICA

Ordenadores que no se bloquean

Nuevos programas administrarían los recursos que consumen las computadoras y las mantendrían en servicio

En verdad, el teléfono «inteligente» de Jim Holt no es tan listo. Tiene una aplicación cartográfica que le sirve para encontrar restaurantes, pero cuando Holt termina la búsqueda, la aplicación continúa consumiendo tanta energía y memoria que ni siquiera puede hacer algo tan sencillo como enviar un SMS.

Holt es ingeniero en Freescale Semiconductor, y su teléfono evidencia un problema habitual en los sistemas informáticos actuales. Mientras los distintos programas consumen todos los recursos que pueden, el sistema operativo no se percata de que la aplicación que el usuario desea utilizar en ese momento apenas tiene con qué actuar. El problema no solo afecta a los teléfonos, sino también a ordenadores personales y supercomputadoras, y se agravará cuantas más máquinas con procesadores multinúcleo existan. A menos que los diversos componentes de un ordenador aprendan a comunicarse unos a otros sus disponibilidades y necesidades, puede que el futuro de la computación no llegue a la altura de su glorioso pasado.

Holt y sus colaboradores del Proyecto Angstrom, un consorcio de investigación encabezado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), han dado con una solución: el ordenador «consciente de sí mismo». En los ordenadores clásicos, el *hardware*, el *software* y el sistema operativo (el correveidile entre uno y otro) apenas saben lo que están haciendo los otros componentes, a pesar de que todos están funcionando en la misma máquina. Un sistema operativo, por ejemplo, desconoce si una aplicación de reproducción de vídeo está forcejeando por recursos, aunque quienes lo estén viendo se den perfecta cuenta de que la imagen va a trompicones.

El equipo del MIT dio a conocer el año pasado Application Heartbeat, un programa que supervisa la marcha de las diferentes aplicaciones. Detecta, por ejemplo, que la aplicación de vídeo está operando a 15 fotogramas por segundo, y no a 30, el valor óptimo.

La idea, en definitiva, consiste en lograr sistemas operativos que identifiquen si las aplicaciones están funcionando con una lentitud inaceptable y, en consecuencia, propongan posibles remedios. Tal vez, con la batería del ordenador a plena carga, el sistema operativo asignaría a la aplicación una mayor capacidad de cómputo. De no ser así, le podría ordenar que utilizase un conjunto de instrucciones de menor calidad, pero más eficiente. El sistema operativo podría adquirir experiencia, de modo que la segunda vez que surgiera el problema lo solucionaría con mayor rapidez. Y un ordenador «consciente» resolvería situaciones complejas, como «haz funcionar estos tres programas, pero concede prioridad al primero» o «ahorra tanta energía como sea posible, mientras no estorbe la reproducción de la película que deseo ver».

El paso siguiente consiste en diseñar un sistema operativo que ajuste los recursos a las necesidades del programa. Si la reproducción del vídeo fuese lenta o con saltos, el sistema operativo le asignaría más potencia. Sin embargo, si estuviera corriendo a 40 fotogramas por segundo, el ordenador podría desviar potencia hacia otro componente, porque el ojo humano no aprecia mejoría al pasar de 30 a 40 fotogramas por segundo. Según Henry Hoffmann, doctorando en informática del MIT que trabaja en el programa, la estrategia permitiría ahorrar el 40 por ciento de la energía que se consume con las prácticas actuales.

Los sistemas conscientes no solo harán que los ordenadores se vuelvan más «inteligentes», sino que podrían resultar esenciales para gestionar los futuros ordenadores, cada vez más complejos, opina Anant Agarwal, director del proyecto. A lo largo del decenio pasado, los ingenieros han ido añadiendo cada vez más unidades básicas de cómputo, o núcleos, a los ordenadores. Los ordenadores de hoy suelen contar con dos o cuatro núcleos, pero las máquinas futuras podrán utilizar desde docenas a millares de ellos. La distribución de las tareas de cómputo, que los programadores actuales efectúan explícitamente, se tornará casi imposible. Un sistema consciente ahorraría tal esfuerzo al programador, al adaptar de forma automática el uso de los núcleos al programa.

La capacidad para gestionar tantos núcleos permitiría alcanzar una mayor velocidad de cómputo y proseguir con la tendencia de crear máquinas cada vez más rápidas. «Dado que tenemos un gran número de núcleos, hemos de contar con sistemas que posean cierto grado de conciencia de sí mismos», afirma John Villasenor, profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de California en Los Ángeles y participante en el Proyecto Angstrom. «Creo que veremos algunos ejemplos dentro de un par de años.» *—Francie Diep*

DINERO

Divisas sin fronteras

La primera moneda digital elimina al intermediario y mantiene el anonimato de los usuarios

Imagínese el lector que entra en un bar y pide el bocadillo de la casa. Al pagar con algunos euros, la cajera le indica: «Muchas gracias, pero necesito su nombre y dos apellidos, NIF, dirección postal, número de teléfono y los diez dígitos de su cuenta bancaria». Casi todos protestaríamos vivamente ante una exigencia así. Sin embargo, así es como pagamos los bienes o servicios que adquirimos por Internet.

No hay en la Red una moneda que posea el anonimato y aceptación de los euros o los dólares. Nos fiamos en cambio de sucedáneos financieros, como las compañías de tarjetas de crédito, para gestionar nuestras transacciones (que se embolsan un porcentaje de la venta, además de quedarse con nuestra información personal). Todo esto podría cambiar con el nacimiento del *bitcoin*, una moneda numérica con tanta liquidez y anonimato como el dinero en efectivo. «Es como si tomásemos un euro, lo introdujésemos en nuestro ordenador y lo enviásemos por Internet a donde nos conviniera», asegura Gavin Andresen, uno de los líderes de la red Bitcoin.

Los bitcoins son cadenas de bits, ristras codificadas que pueden ser enviadas de un usuario a otro por una red p2p, de igual-a-igual. Mientras que la gran mayoría de las cadenas de bits pueden ser copiadas cuantas veces se quiera —lo que dejaría sin valor a cualquier clase de dinero—, los usuarios solo pueden utilizar los bitcoins una vez. Sistemas criptográficos muy robustos protegen a los bitcoins frente a posibles robos, y la red entre iguales elimina la necesidad de una central de compensación, como Visa o PayPal. El sistema dota de poder a los usuarios, no a los intermediarios financieros.

Bitcoin se inspira en ideas bien conocidas en los programas de criptografía. El programa le asigna a cada usuario dos códigos sin copia: una clave privada, que se oculta en el ordenador del usuario, y una dirección pública que todos pueden ver. La clave y la dirección se hallan vinculadas matemáticamente, pero averiguar la clave privada a partir de su dirección resulta casi imposible. Si poseo 50 bitcoins que deseo transferir a una persona, el *software* combina mi clave con la dirección del beneficiario. Otras personas de la red pueden utilizar la relación entre mi clave privada y mi dirección pública para verificar que yo poseo los bitcoins que deseo gastar, tras lo cual transfieren esos bitcoins mediante un algoritmo que abre el mensaje codificado. Al primer ordenador que termina los cálculos se le premia de cuando en cuando con unos bitcoins, lo que recluta a un variopinto colectivo de usuarios que mantiene el sistema.

La primera compra efectuada con bitcoins de la que se tiene constancia fue una pizza, vendida por 10.000 bitcoins a principios del 2010. Desde entonces, las tasas de cambio entre el bitcoin y el dólar estadounidense han ido fluctuando como las notas de un solo de jazz. Debido a la volatilidad de esta divisa, resultará difícil hallar un comerciante que acepte ser pagado en bitcoins. En este momento la comunidad Bitcoin es pequeña, pero sumamente entusiasta. Como los primeros en adoptar Internet.

—Morgen Peck

MATERIALES

Mineros microbianos

Bacterias que extraen metales y limpian desechos

La minería no ha cambiado gran cosa desde la Edad de Bronce: para extraer metal de la mena, aplíquese calor y un agente reductor, como el carbón vegetal. Pero esta técnica exige muchísima energía, por lo que resulta demasiado cara cuando la concentración del metal es baja.

Los mineros están recurriendo cada vez más a bacterias que extraen metales de menas pobres, de forma económica y a temperatura ambiente. Se consigue así extraer hasta el 85 por ciento de un metal cuya concentración en el mineral no alcanza el uno por ciento. Basta con sembrar con microbios una pila de escoria y regarla con ácido diluido. En el interior de la pila, las bacterias *Acidithiobacillus* o *Leptospirillum* oxidan hierro y azufre para obtener energía. Al nutrirse, generan hierro férrico y ácido sulfúrico, sustancias que a su vez degradan los materiales rocosos y liberan el metal valioso.

Las técnicas biológicas están empleándose también para limpiar derrames ácidos de minas agotadas, proceso que permite extraer los últimos y preciosos restos del metal. Las bacterias *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum* neutralizan ácidos y crean sulfuros que, al enlazarse con cobre, níquel y otros metales, separan estos de la disolución.

La biominería ha experimentado un crecimiento sin igual en años recientes, por la escasez, cada vez más acusada, de menas ricas. Casi el 20 por ciento del cobre mundial procede de biominería, y la producción se ha duplicado en los últimos quince años, afirma Corale Brierley, consultora de minas. Según ella, «lo que las compañías mineras solían desechar como escombro, hoy lo llamamos mena».

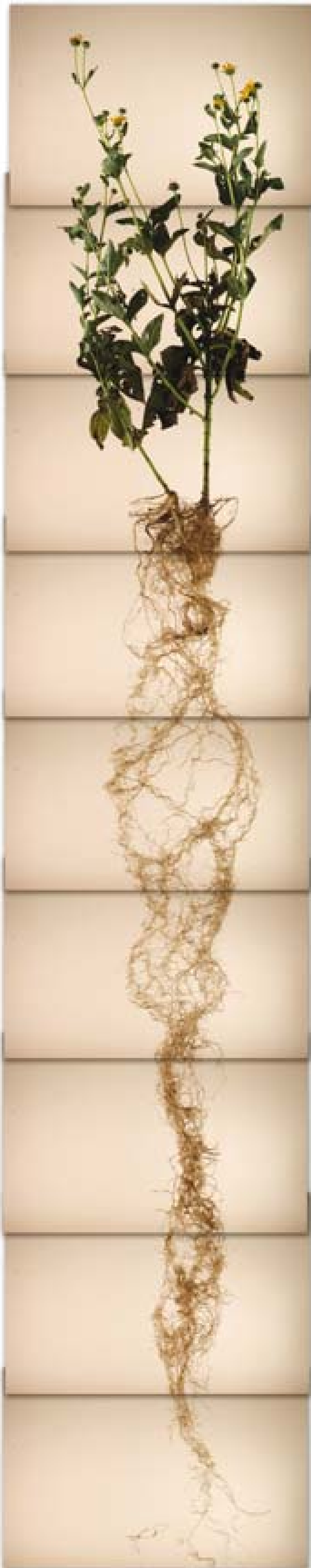
El paso siguiente consistirá en soltar bacterias limpiadoras en los desechos mineros. David Barrie Johnson, de la Universidad de Bangor, en Gales, que investiga soluciones biológicas para el drenaje de ácidos procedentes de las minas, estima que se tardará unos 20 años hasta que la limpieza bacteriana compense los gastos. Dado que el mundo se mueve hacia una sociedad menos dependiente del carbón, debemos buscar estrategias que consuman menos energía y sean más respetuosas con el ambiente, opina Johnson. «Ese es el objetivo a largo plazo. Y ya se han iniciado movimientos en esa dirección.»

—Sarah Fecht

AGRICULTURA

Cultivos plurianuales

Las variedades perennes pueden estabilizar los suelos y aumentar las cosechas. Y mitigar incluso el cambio climático



CORTESÍA DE JIM RICHARDSON

Sol de invierno: Este girasol es un híbrido entre una variedad anual del girasol y un pariente silvestre perenne.

Antes de la agricultura, la mayor parte del planeta se hallaba cubierta por vegetales que vivían durante años. Estas plantas perennes se fueron sustituyendo gradualmente por cultivos alimentarios que es preciso volver a sembrar tras la cosecha. Pero ahora se está estudiando la posibilidad de invertir la situación mediante la creación de variedades perennes de cultivos tan comunes como el trigo y el maíz. Si se lograse, podrían obtenerse cosechas mucho más abundantes en las tierras cultivables de algunos de los lugares más pobres del mundo. Y las plantas podrían también secuestrar parte del exceso de carbono que contiene hoy la atmósfera terrestre.

Los agrónomos llevan decenios soñando con reemplazar los cultivos, anuales o de temporada, perecederos, por cultivos permanentes. Pero, hasta hace solo diez o quince años, no se disponía de las técnicas genéticas que lo hicieran posible, explica el agroecólogo Jerry Glover. Las plantas perennes ofrecen numerosas ventajas sobre los cultivos que deben sembrarse todos los años: sus hondas raíces protegen el suelo frente a la erosión, que así retiene elementos esenciales como el fósforo, y exigen menos fertilizantes y agua que los cultivos anuales. Mientras que los monocultivos tradicionales contribuyen a aumentar las emisiones carbónicas a la atmósfera, las plantaciones perdurables, al no requerir ser aradas, constituyen un sumidero de carbono.

Los campesinos de Malawi están obteniendo cosechas muy superiores plantando hileras de guandúes (*Cajanus cajan*, una leguminosa arbustiva perenne) entre las hileras de su principal alimento, el maíz. Los guandúes constituyen no solo una fuente de proteínas, tan necesarias en una agricultura de subsistencia, sino que aumentan también la retención de agua en el suelo y duplican en él los contenidos de nitrógeno y carbono, sin reducir los rendimientos del cultivo primario.

No obstante, deberá realizarse un importante esfuerzo científico para llevar los cultivos perennes al siguiente nivel, esto es, su adopción a una escala que los equipare a los tradicionales. Ed Buckler, experto en genética vegetal de la Universidad Cornell, se propone desarrollar una versión perenne del maíz. Opina que harán falta unos cinco años para identificar los genes responsables y un decenio más para conseguir una cepa viable. «Incluso si se aplican todos los recursos técnicos disponibles estaríamos hablando, casi con certeza, de unos 20 años, a contar desde el presente, para obtener un maíz perenne», añade Glover.

El desarrollo de cultivos permanentes ha experimentado un empuje gracias a las técnicas punteras de genotipificación. En la actualidad se pueden analizar en poco tiempo los genomas de plantas dotadas de características deseables y buscar asociaciones entre los genes y dichos rasgos. Cuando una primera generación de plantas produce semillas, se secuencian directamente las plántulas para buscar entre millares de ellas las pocas que retienen las propiedades deseadas, en lugar de esperar al estado adulto, que puede tardar años.

Cuando se obtengan las variedades perennes de los cultivos anuales, su implantación podría implicar grandes efectos sobre las emisiones carbónicas. La clave reside en sus sistemas radiculares, que secuestrarían, en cada metro cúbico de suelo superficial, una cantidad de carbono equivalente al 1 por ciento de la masa de esa tierra. Douglas Kell, presidente del Consejo Británico de Investigación en Ciencias Biológicas y Biotecnológicas, ha calculado que si cada año se sustituyera el 2 por ciento de los cultivos anuales de todo el mundo por cultivos perennes, se podría retirar de la atmósfera suficiente dióxido de carbono como para detener su aumento. Y si todas las tierras cultivables se dedicasen a cultivos perennes, el secuestro de dióxido de carbono alcanzaría las 118 partes por millón, cantidad suficiente para reducir la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero a valores preindustriales.

—Christopher Mims

ENERGÍA

Combustible líquido para vehículos eléctricos

Un nuevo tipo de batería permitiría sustituir los combustibles fósiles por «crudo nanotécnico»



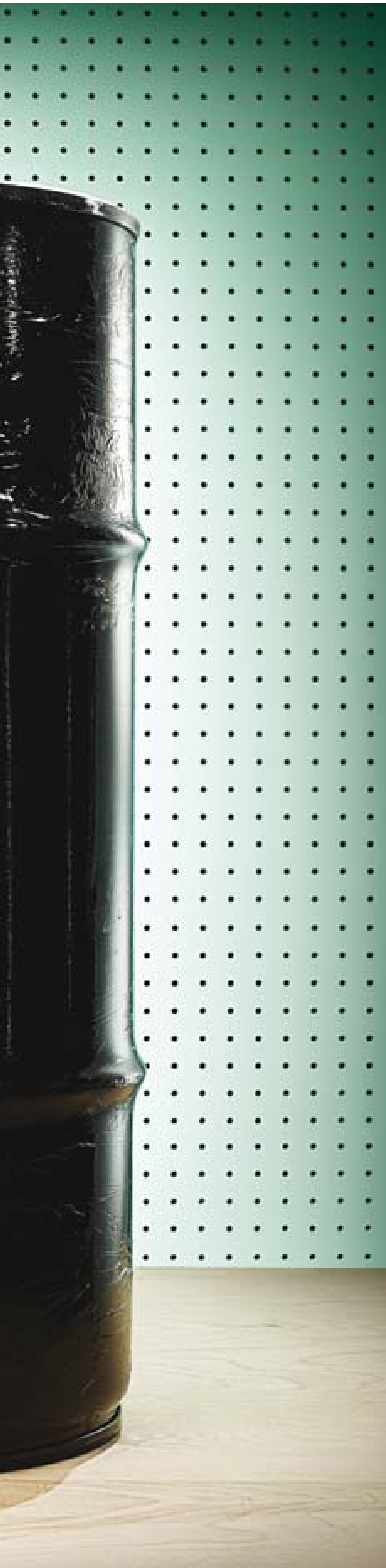
LA CLAVE para que los vehículos eléctricos puedan recorrer cientos de kilómetros sin recargar se halla en el desarrollo de baterías de mayor capacidad. Pero con la tecnología existente, los progresos en esa dirección solo se producen de forma gradual y los grandes avances parecen lejanos. No obstante, un cambio en la composición interna de las baterías modernas ofrece la posibilidad de duplicar la energía que puede almacenarse en ellas.

La idea se le ocurrió al profesor Yet-Ming Chiang, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, durante un año sabático en A123 Systems, compañía de la que es socio fundador. ¿Y si hubiera una forma de combinar las mejores características de las baterías de flujo, que introducen electrolitos líquidos en la célula, con la densidad energética de las baterías de litio, como las usadas en la electrónica de consumo?

Las baterías de flujo almacenan la electricidad en depósitos de electrolito líquido. Pero poseen una escasa densidad energética, esto es, la cantidad de energía almacenada por unidad de masa. Su mayor ventaja reside en la posibilidad de aumentar la capacidad: basta construir tanques mayores para los electrolitos.

Chiang y sus colaboradores han creado un prototipo de batería que posee tanta densidad energética como la de litio, pero cuyo medio de almacenamiento es esencialmente líquido, como en la de flujo. Chiang lo llama «crudo de Cambridge»: una emulsión negra integrada por nanopartículas y por gránulos metálicos que almacenan electricidad. Si pudiéramos observar el crudo de Cambridge al microscopio electrónico veríamos partículas pulverulentas, de los mismos materiales que componen muchas baterías de litio, como óxido de litio y cobalto (para el ánodo) y grafito (para el cátodo). Intercaladas entre estas partículas relativamente grandes, suspendidas en un líquido, descubriríamos nanopartículas de carbono, el ingrediente secreto de esta innovación.

En este medio se forman «filamentos líquidos» que, apiñados, crean una especie de tejido esponjoso que conecta los gránulos de la batería, mucho mayores, donde se almacenan los iones y electrones. El resultado es un líquido, en el que, incluso al fluir, sus componentes nanométricos mantienen sin cesar sendas por las que viajan los electrones entre gránulos de almacenamiento.



«Se trata de un material compuesto con propiedades eléctricas excepcionales», afirma Chiang. «No conozco nada que se le parezca.»

Como la batería funciona con un líquido, aparecen varias posibilidades interesantes; entre ellas, que vehículos equipados con tales baterías puedan repostar crudo de Cambridge en la estación de servicio para renovar su carga. W. Craig Carter, también del MIT y colaborador de Chiang en el proyecto, sugiere que en lugar de repostar en surtidores, se podría reemplazar un recipiente (algo así como una bombona de butano) por otro de electrolito cargado.

Pero la transferencia de electrolito cargado a las baterías no es la única aplicación comercial que Chiang persigue. En asociación con Carter y el empresario Throop Wilder, ha fundado una nueva compañía, 24M Technologies, para llevar al mercado el trabajo del equipo. Carter y Chiang no desvelan cuál será el primer producto que se lance; no obstante, subrayan la idoneidad de estas baterías para aplicaciones de almacenamiento en la red eléctrica. Incluso una pequeña cantidad de energía almacenada puede mejorar de forma notable el rendimiento de fuentes energéticas intermitentes, como la eólica y la solar, afirma Chiang. Las baterías para esta clase de servicios poseerían al menos diez veces más densidad energética que las baterías de flujo actuales, lo que las haría más compactas y, posiblemente, más económicas.

Sin embargo, el crudo de Cambridge ha de recorrer un largo camino antes de ser comercialmente viable. «Un escéptico podría decir que el número de inconvenientes que presenta el invento supera las posibles ventajas que se obtendrían en caso de solucionarlos», opina el director de un importante programa de investigación sobre almacenamiento de energía de una universidad, que no revela su identidad para no ofender a un colega. Toda la maquinaría necesaria para bombear el fluido a través de las células de la batería añade al sistema masa no deseada. «El peso y el volumen de las bombonas y conducciones, así como del electrolito y los aditivos de carbono, podrían hacer que la técnica resultara más engorrosa que las mejores ya disponibles.» Además, con el paso del tiempo y la repetición de ciclos de carga y descarga, tales baterías podrían no ser tan estables como las de litio actuales.

Una objeción de más peso es el período de carga de las nuevas baterías, de dos a cuatro veces superior al de las baterías clásicas, explica Carter. En el caso de vehículos que exigen transferencias energéticas rápidas, ello supondría un problema. Una forma de evitarlo consistiría en acoplarlas con baterías clásicas, o con ultracapacitores, que se cargan o descargan en cuestión de segundos, lo que permitiría la transferencia de energía durante el frenado y la aceleración.

Con todo, el nuevo diseño resulta prometedor. Un sistema que almacene energía en «líquidos particulados» debería ser compatible con la química de casi cualquier tipo de batería, considera Yury Gogotsi, ingeniero de materiales en la Universidad Drexel, lo que multiplica sus futuras aplicaciones en este campo. Según él, «se abre una nueva era en el diseño de baterías». —*Christopher Mims*

MEDICINA

Germicidas nanométricos

Diminutos bisturíes permitirían terminar con los bacilos resistentes

Según la Organización Mundial de la Salud, la tuberculosis farmacorresistente está haciendo estragos en Europa. Las opciones para su tratamiento son escasas, porque los antibióticos resultan ineficaces contra estas cepas sumamente evolucionadas. Alrededor del 50 por ciento de quienes contraen la enfermedad fallecen por su causa. Tan lamentable situación refleja la lucha contra otras enfermedades farmacorresistentes, caso de la infección por *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM), que está costando ya, solo en Estados Unidos, 19.000 vidas al año.

La esperanza llega en forma de un bisturí nanométrico. Científicos de IBM-Research Almaden han diseñado una nanopartícula que podría destruir células bacterianas por perforación de sus membranas.

Las cápsulas de esas nanopartículas tienen carga positiva, por lo que se adhieren a las membranas bacterianas dotadas de carga negativa. «La partícula alcanza la célula, se une a su superficie y, al volverse del revés como un guante, perfora la membrana», explica Jim Hedrick, experto en materiales de IBM que trabaja en el proyecto junto con investigadores del Instituto de Bioingeniería y Nanotecnología de Singapur. Con la membrana alterada, la bacteria se arruga y se encoge como un globo pinchado. Las nanopartículas resultan inocuas para los humanos (no afectan, por ejemplo, a los glóbulos rojos) porque las membranas de sus células poseen una carga distinta a las de las bacterias. Las nanoestructuras, cumplida su misión, son descompuestas por enzimas, y el organismo se encarga de eliminarlas.

Hedrick confía en que se realicen ensayos clínicos de las nanopartículas en humanos en los próximos años. Si la metodología resulta viable, se podría rociar o untar la piel de los pacientes con geles o lociones infundidos con nanopartículas, y poner así freno a las infecciones por SARM. También podrían inyectarse en la circulación sanguínea para detener organismos sistémicos resistentes a los fármacos, como los estreptococos, que pueden producir infección general y muerte. Un tratamiento tal, aún con éxito, tendría que superar los posibles temores que despertarían las perforaciones nanotécnicas en el torrente circulatorio. Pero los microbios más peligrosos del planeta no van a sucumbir fácilmente. —*Elizabeth Svoboda*

David Weinberger investiga en el Centro Berkman para Internet y la Sociedad de la Universidad de Harvard. Es codirector del Laboratorio de Innovación de la Biblioteca de Harvard en la facultad de derecho de dicha universidad.



TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

Simular el planeta en tiempo real

Si introdujéramos todos los datos relevantes del planeta en un superordenador, ¿podría ayudarnos a predecir acontecimientos futuros? Un experto que así lo cree quizá reciba mil millones de euros de la UE para materializar el proyecto

David Weinberger

La crisis financiera que el año pasado castigó a Grecia reventó las costuras de la economía mundial. Tras acumular una deuda que jamás podría devolver, el país se enfrentaba a un cúmulo de consecuencias nefastas. Los recortes del gasto público avivaron las revueltas en las calles de Atenas y las amenazas de quiebra hicieron temblar los mercados financieros internacionales. Numerosos economistas recomendaron que Grecia abandonase el euro y devaluara su divisa; algo que, en teoría, ayudaría a reactivar el crecimiento. «No nos equivoquemos, una salida ordenada del euro será muy complicada», escribía en el *Financial Times* Nouriel Roubini, economista de la Universidad de Nueva York, «pero mucho peor resultará contemplar el estallido lento y anárquico de la economía y la sociedad griegas».

EN SÍNTESIS

Un proyecto de investigación persigue construir un ordenador que ayude a predecir todo tipo de situaciones a escala mundial.

Las diferentes simulaciones se nutrirían de las enormes cantidades de datos a las que hoy pueden acceder los expertos.

Muchos piensan, sin embargo, que ningún modelo podrá dar cuenta de la gran complejidad que se deriva del comportamiento humano.

Otras propuestas abogan por una «máquina del conocimiento» basada en los principios de la web: interconexión y debates.

FOTOGRAFÍA DE DAN SAELINGER; ESTILISMO DE OBJETOS LAURIE RAAB, HALLEY RESOURCES


SIGNS
POINT TO
YES

Nadie podía prever el curso de los acontecimientos. Cundió el temor de que, si Grecia abandonaba el euro, llegara después el turno de España e Italia. *The Economist*, por su parte, opinaba que la crisis redundaría en un mayor control de la política fiscal desde Bruselas, lo que a la postre acabaría fortaleciendo la integración de la eurozona. Pero las consecuencias llegarían más allá: la emigración a la UE podría concentrarse hacia Grecia, convertida de repente en una nación más asequible; la caída del turismo limitaría la propagación de epidemias y la alteración de las rutas comerciales dejaría su huella sobre los ecosistemas. La pregunta en sí era sencilla: ¿debía Grecia abandonar el euro o no? Pero la respuesta comportaba repercusiones tan profundas y complejas que ni siquiera las mentes más preclaras podían abarcarlas todas.

Cuestiones de tal envergadura indujeron a Dirk Helbing, físico y titular de la cátedra de sociología de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, a proponer la construcción de un ordenador que funcionase a modo de bola de cristal mundial. Este no solo simularía un sector de las finanzas, la economía o el medioambiente, sino todos ellos en tiempo real: un mundo dentro del mundo. Este asistiría a los dirigentes en la toma decisiones ante problemas complejos. La pieza central del proyecto ha sido bautizada como Living Earth Simulator (LES, o «simulador de una Tierra viva»), un procesador sin precedentes que crearía modelos a escala planetaria de los sistemas económicos, políticos, culturales, sanitarios, de explotación agrícola y de desarrollo técnico, entre otros. Para ello, integraría enormes cantidades de información junto a todos los algoritmos y el equipo físico necesarios. En mayo del año pasado, la Comisión Europea incluyó el proyecto de Helbing entre los seis finalistas del programa Proyectos Punteros en Tecnologías Emergentes y Futuras (Future and Emerging Technologies Flagships). A las propuestas seleccionadas se les concedió el plazo de un año para refinar los detalles. Bajo el eslogan «Ciencia más allá de la ficción», la iniciativa pretende financiar con mil millones de euros el proyecto ganador.

El sistema representa la expresión más ambiciosa de la tendencia creciente a trabajar con cantidades descomunales de datos, un proceso que numerosos expertos equiparan a la invención del microscopio o el telescopio. Como explica Nicholas Christakis, sociólogo y profesor de medicina en Harvard, el crecimiento exponencial de la información en formato digital ha propiciado una integración de la computación, las ciencias sociales y la biología que permite atacar cuestiones hasta hace poco inabordables. Como ejemplo, señala la ubicuidad de los teléfonos móviles, creadores de océanos de datos acerca de los movimientos de las personas, sus compras e, incluso, indicios de lo que piensan. La combinación de esa información con otra de índole muy variada (genética, económica, política) alumbra, en opinión de muchos, nuevos campos de análisis.

David Lazer, profesor de la Escuela de Ciencias Informáticas y de la Información de la Universidad Nororiental, se cuenta entre los defensores del proyecto de Helbing. Afirma que los avances científicos se deben a menudo a la aparición de nuevos instrumentos que invitan a emprender proyectos insólitos: «La ciencia puede compararse a un borracho que busca las llaves de su casa bajo la luz de un farol porque allí se ve mejor». Y mil millones de euros podrían iluminar muy bien un largo recorrido investigador.

Otros expertos, en cambio, no creen necesario reunir todos los datos del mundo en un sistema centralizado. Sostienen que sería preferible crear nubes de datos en Internet, conectadas entre sí y accesibles a todos. Un formato de datos compartidos brindaría a más personas la oportunidad de estudiarlos, encontrar conexiones entre ellos y crear un bullente mercado de ideas.

UN PASO MÁS

Hallar correlaciones en conjuntos gigantescos de datos no supone nada nuevo. A modo de ejemplo, Alex Pentland, director del Laboratorio de Dinámica Humana del Instituto de Tecnología de Massachusetts, recuerda que un volumen enorme de datos anónimos relativos al comportamiento humano permitió obtener indicios sobre los factores conductuales y ambientales que desencadenan ciertos trastornos, como la diabetes de tipo 2. En su opinión, esta manera de investigar hace que el Estudio Framingham sobre enfermedades cardiovasculares (una investigación pionera que comenzó en 1948 y abarcó a 5209 pacientes) parezca una sesión de grupo.

Pero el proyecto de Helbing, cuyo nombre oficial es FuturICT, va más allá de la mera extracción de datos. Comprenderá observatorios mundiales de crisis que detectarán problemas emergentes, como la escasez de alimentos o la aparición de epidemias, además de un sistema que agregará los datos obtenidos por un conjunto de sensores distribuidos por todo el planeta. Pero el corazón de FuturICT será el LES, con el que se pretende modelizar la infinidad de fuerzas sociales, biológicas, políticas y físicas que actúan en el mundo y valerse de ellas para escudriñar el futuro.

Llevamos decenios utilizando simulaciones. En 1949, el ingeniero y economista Bill Phillips modelizó la evolución de la economía británica gracias a MONIAC, un computador hidráulico construido con piezas de fontanería y el motor de un limpiaparabrisas. Un líquido coloreado simulaba los flujos de renta, ajustados según el consumo, los impuestos y otras actividades económicas. Aunque hoy semejante dispositivo nos parezca muy primitivo, simboliza el principio básico de toda simulación: se estipula una serie de relaciones entre los factores que se desean analizar, se introducen los datos y se observan los resultados. Si las predicciones no se cumplen, el fallo se convierte en valiosa información que sirve para refinar el modelo.

La sociedad actual depende de los modelos tanto como de los ordenadores. Pero ¿es posible añadir suficientes tubos y bombas para simular no solo los efectos que a corto plazo generaría una erupción volcánica sobre la economía, sino también su repercusión en otros dominios de la conducta humana, como la educación o la distribución de vacunas? Helbing cree que sí. Su confianza se basa, en parte, en su experiencia y éxito pasados a la hora de simular el tráfico. Un modelo creado por su grupo de investigación demostró que, para acabar con las retenciones en carretera, bastaría con reducir de la manera adecuada la distancia entre vehículos (aunque, por desgracia, esa distancia resulta tan pequeña que exigiría que el conductor fuese un robot). Helbing menciona también otro modelo que simulaba la circulación de fieles durante las peregrinaciones a La Meca. Este desembocó en una inversión de 800 millones de euros para reformar calles y puentes a fin de evitar futuras muertes por aplastamiento. Helbing defiende que FuturICT representa, en esencia, el siguiente paso en esta línea de investigación.

Pero, en opinión de Gary King, director del Instituto de Ciencia Social Cuantitativa de Harvard, las simulaciones basadas en agentes autónomos solo resultan aplicables en un reducido número de circunstancias. Vehículos y peregrinos circulan todos en una misma dirección; además, comparten un mismo ob-

jetivo: llegar con la mayor rapidez y seguridad. FuturICT, sin embargo, pretende modelizar sistemas en los que las personas actúan por las más diversas motivaciones (egoístas o altruistas) e incentivos (hacer fortuna, casarse o huir de la prensa), y en los que todo se halla sujeto a contingencias (la muerte de un líder mundial o una catástrofe) y complejas retroalimentaciones (un modelo financiero desaconseja apoyar a la industria, lo que aterroriza aún más al mercado). Además, surgen conductas que responden a las predicciones de modelos afines: el modelo económico de una ciudad, por ejemplo, puede depender de las simulaciones de tráfico, producción agrícola, demografía, clima y epidemiología, entre otras.

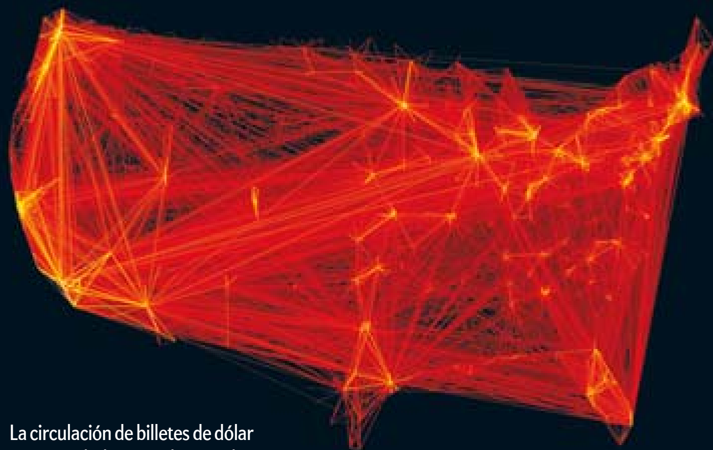
Más allá de la enorme complejidad de la propuesta, existen otros problemas que FuturICT deberá superar. En primer lugar, carecemos de una teoría satisfactoria sobre el comportamiento social. King explica que, cuando conocemos el funcionamiento de un sistema (en física, por ejemplo), resulta posible simularlo. Sin embargo, el poder predictivo de las mejores teorías sociales palidece en comparación con el de las leyes de la física.

King apunta una alternativa: en ocasiones, un número suficiente de datos permite construir modelos a partir del análisis de las regularidades que aparecen en ellos, aunque desconozcamos qué leyes los rigen. Si registrásemos la temperatura y la humedad en cada punto del planeta durante un año, por ejemplo, podríamos elaborar pronósticos meteorológicos con un buen grado de aproximación, aun sin saber nada sobre dinámica de fluidos o sobre la radiación solar.

APLICACIONES A LA SANIDAD PÚBLICA

Enfermedades y dinero

Imaginemos que apareciese un virus letal. ¿Cómo se propagaría? Físicos y epidemiólogos ya han comenzado a estudiar ingentes volúmenes de datos para predecir la expansión de una pandemia. En 2009, a partir de la información del proyecto Where's George, que rastrea los movimientos de millones de billetes de dólar a través de EE.UU., fue posible crear un modelo que predijese la difusión del virus de la gripe H1N1. Con el mismo fin se han empleado los datos del tráfico aéreo y terrestre. Ambos estudios dejaron patentes sus ventajas e insuficiencias: si bien predijeron con acierto la extensión de la enfermedad, subestimaron el número de personas que acabarían infectadas.



La circulación de billetes de dólar a través de los Estados Unidos refleja los movimientos de las personas... y el de los virus.

DE: «THE STRUCTURE OF BORDERS IN A SMALL WORLD», C. THIEMANN, F. THEIS, D. GRADY, R. BRUNE Y D. BROCKMANN EN *PLOS ONE*, VOL. 5, N.º 11; 2010.

Albert-László Barabási, director del Centro de Investigación de Redes Complejas de la Universidad Nororiental y asesor del proyecto de Helbing, ha comenzado a utilizar datos para desmenuzar la regularidad de los hábitos humanos. Su grupo acaba de presentar un modelo que predice, con una fiabilidad del 90 por ciento, dónde se encontrará una persona a las 5 de la tarde del día siguiente a partir del análisis de sus movimientos durante los días anteriores. El modelo no toma en cuenta ninguna información psicológica, técnica ni económica: se limita a estudiar y extrapolar los datos de los que dispone.

Con todo, a veces el volumen de datos requerido para aplicar dichos métodos supera con creces nuestras posibilidades. Para resolver un problema en el que interaccionan 100 factores con la misma precisión que uno en el que intervienen solo dos, pueden llegar a necesitarse tantos datos como estrellas hay en el universo, según explica Cosma Shalizi, estadístico de la Universidad Carnegie Mellon. El experto concluye que la única opción viable reside en los modelos sencillos. Obtener simulaciones que reflejen toda la complejidad social a partir de meros datos constituye, en su opinión, una empresa sin futuro.

Pero FuturICT no se basará en un solo modelo, por complejo que sea. Helbing anuncia que integrará «informática, teoría de sistemas complejos, ciencias sociales (economía y política incluidas) y cognitivas», entre otros campos. Pero esas combinaciones generan una complejidad explosiva. «Supongamos que la meteorología y el tráfico admiten 10 resultados cada uno», señala King, «y que deseamos evaluar todas las posibilidades. Estas no ascienden a 20, sino a 100. Ello no implica que afrontar el problema resulte imposible, pero sí nos informa sobre la velocidad de vértigo a la que crecen los datos».

Pero el desafío va más allá: las conclusiones de un modelo pueden alterar la misma situación que se está simulando. Según Alessandro Vespignani, director del Centro de Investigación de Redes y Sistemas Complejos de la Universidad de Indiana y principal arquitecto de datos del proyecto, ahí reside la gran incógnita: «¿Cómo desarrollar modelos que incluyan bucles de retroalimentación y actualicen de manera continua los algoritmos, si las predicciones influyen sobre las mismas condiciones que se están simulando?».

Por otra parte, los distintos modelos que incluyese un sistema como FuturICT deberían acoplarse entre sí de un modo muy particular. Supongamos que empleamos una simulación para evaluar la conveniencia de reclamar cierta extensión de suelo para nuestro municipio. Si esta no considera las repercusiones sobre la cadena alimentaria, el resultado podría ser bueno para la economía pero desastroso para el entorno. Solo tener en cuenta la alimentación de 10 millones de especies constituiría una tarea sobrecogedora. Pero, para afrontar un problema como el anterior, tampoco bastaría con conocer la dieta de cada especie de la zona. Jesse Ausubel, experto en medioambiente de la Universidad Rockefeller, señala que un análisis del ADN hallado en

el estómago de un murciélago permite conocer con exactitud de qué se alimenta ese animal. Pero otros murciélagos de la misma especie que habiten en cuevas distantes llevarán una dieta diferente. Sin esos datos, la dependencia en modelos interrelacionados podría comportar resultados poco fiables y una acumulación de errores en cascada.

Nada asegura que una mente humana pueda entender por qué un superordenador llega a esas respuestas

Aunque en teoría resulte posible construir modelos sobre fenómenos complejos sin apoyarse en ley alguna, las dificultades prácticas crecen enseguida de manera exponencial. Siempre surge otro nivel de detalle, otro factor tal vez decisivo en el resultado final. Sin una comprensión previa del comportamiento humano, jamás podremos asegurarnos de haber incluido toda la información relevante.

El tratamiento de enormes cantidades de datos ha resultado muy provechoso en disciplinas como la genética o la astrofísica. Pero el éxito en ámbitos aislados no asegura la victoria si lo que deseamos es considerar las interacciones que existen entre ellos. Además, puede que exista un límite natural para cualquier modelo que se proponga simular el comportamiento humano. A fin de cuentas, este hace gala de dos propiedades que siempre han caracterizado a todo sistema impredecible: el fenómeno conocido como «cisne negro» y la teoría del caos.

CONOCER SIN ENTENDER

El 17 de diciembre de 2010, Mohamed Bouazizi, vendedor ambulante en la pequeña ciudad tunecina de Sidi Bouzid, se inmoló en señal de protesta contra la corrupción local imperante. Esta singular acción encendió una revolución popular que se propagó por el mundo árabe y acabó con décadas de dictadura en Egipto y Libia, lo que puso fin al equilibrio de poder en la región más rica en petróleo del mundo.

¿Qué modelo hubiera podido predecir un suceso semejante? ¿Y los ataques del 11 de septiembre de 2001, con todas sus repercusiones? ¿Y que de una red interna de investigación acabaría surgiendo Internet, un sistema que propiciaría el nacimiento de numerosas empresas y la quiebra de otras? Este es el problema del cisne negro, popularizado en 2007 por Nassim Nicholas Taleb en su obra homónima. En palabras de Ausubel: «El mundo siempre se muestra más complejo que los modelos. Siempre se escapa algo».

Pero los sistemas sociales, políticos y económicos que Helbing desea modelizar no solo son complejos: son caóticos. Cada uno de ellos comprende cientos de factores cuyas relaciones mutuas resultan muy confusas y cuya evolución depende en gran medida de las condiciones iniciales. En un sistema caótico, todo fenómeno obedece una serie de causas; pero estas se multiplican de tal manera que el comportamiento emergente resulta imposible de predecir, salvo a muy grandes rasgos. Jagadish Shukla, climatólogo de la Universidad George Mason y presidente del Instituto para el Medioambiente y la Sociedad Global, explica que, si bien la predicción meteorológica cubre ahora un horizonte de cinco días, tal vez nunca logre exceder las dos semanas: «Por muchos sensores que instalemos, las condiciones iniciales y los modelos que empleemos siempre adolecerán de algún error».

Shukla hace hincapié en la distinción entre tiempo meteorológico y su análisis estadístico, el clima. Quizá no pueda predecirse si dentro de cien años lloverá por la tarde tal día como hoy, pero sí a cuánto ascenderá entonces la temperatura media del océano. Según Shukla, el clima conforma un sistema caótico que admite ciertas predicciones. Así ocurrirá en los modelos de Helbing: «Puede que los cambios en los mercados financieros resulten más difíciles de predecir que los de la atmósfera, pero el hecho de que antes o después sobrevenga una crisis financiera podría deducirse a partir de algunos datos macroeconómicos (por ejemplo, que durante varios años los gastos en EE.UU. hayan crecido más que los ingresos)». Sin embargo, no parece que para alcanzar dicha conclusión se requieran grandes ordenadores, galaxias de datos ni mil millones de euros.

Si lo que se pretende es asesorar con bases científicas a los gobernantes, como subraya Helbing, se plantean algunas cuestiones de índole práctica: no queda claro que una mente humana pueda llegar a entender la razón por la que un superordenador llega a una determinada conclusión. Cuando se trata de un modelo sencillo, como la simulación hidráulica de la economía británica, resulta posible volver atrás para descubrir que la merma en el ahorro de los contribuyentes se debió a un efecto inesperado de una subida de impuestos demasiado rápida. Pero, si hablamos de una simulación que maneja volúmenes descomunales de información y cuya operación incluye una retroalimentación constante de datos, quizá los resultados escapen a nuestra capacidad de análisis. Sabríamos algo, pero no habríamos entendido nada.

Al preguntarle a Helbing sobre esa limitación, responde que poco a poco emergerían principios y ecuaciones inteligibles, como ocurrió en sus estudios sobre el tráfico. Con todo, la intersección de sistemas financieros, comportamientos sociales, movimientos políticos, meteorología y geología conforma un sistema varios órdenes de magnitud más complejo que el formado por tres carriles de tráfico que avanzan en una misma dirección. Quizá por eso jamás comprenderíamos un modelo que predijese un desastre en el supuesto de que Grecia abandonase el euro.

Sin entender las razones que dictan la elección de una política determinada, ningún dirigente podrá ponerla en práctica; sobre todo, si comporta decisiones en apariencia ridículas. Victoria Stodden, estadística de la Universidad de Columbia, plantea el caso de un gobernante que, tras leer los resultados de FuturICT, anunciase: «Para superar la crisis económica necesitamos incendiar todos los pozos petrolíferos del mundo». En ausencia de una justificación razonada, algo así jamás podría llevarse a cabo.

DATOS PARA TODOS

El FuturICT concebido por Helbing requiere una organización centralizada que gestione un reto tan complejo y diverso: Helbing supervisaría un proyecto planetario que se encargaría del equipo informático, recogería datos y entregaría los resultados.

John Wilbanks, vicepresidente científico de Creative Commons, comparte el entusiasmo de Helbing por las ventajas de analizar ingentes volúmenes de datos. Sin embargo, deposita una mayor esperanza en Internet que en una sola institución. Wilbanks es uno de los impulsores de un proyecto que persigue organizar grandes conjuntos de datos en la Red y ponerlos a disposición de todos, a fin de que cualquier científico pue-

da participar en un mercado abierto de ideas, modelos y resultados.

Ambos enfoques se basan en valores diferentes. Un tratamiento más colaborativo quizá no goce de las ventajas de un análisis cuidadoso y experto, propio de un sistema cerrado. Pero Wilbanks cree que eso se vería compensado con creces por la *generatividad*, término acuñado por Jonathan Zittrain en *The future of the Internet* («El futuro de Internet», 2008): «La capacidad de un sistema para producir cambios inesperados a través de contribuciones procedentes de amplios y variados auditorios, sin ningún género de criba». Hoy vemos cómo la Red, un sistema que permite participar a todo el mundo, se ha convertido en un poderoso motor de creatividad. En opinión de Wilbanks, la ciencia avanzaría con extrema rapidez si tuviese acceso a la mayor cantidad de datos posible. Una información al alcance de todos podría manejarse con facilidad y ordenarse según disciplinas, instituciones y modelos.

En los últimos años ha aparecido un nuevo «lenguaje» que podría facilitar el sueño de Wilbanks. Se basa en los principios que Tim Berners-Lee, creador de la Red Informática Mundial (World Wide Web, o www), sentó en 2006: presentar la información en forma de «datos vinculados»: *X* se relaciona con *Y* de la manera especificada por la persona que aporta los datos. Por ejemplo, si Creative Commons quisiera exponer los datos de su plantilla en forma de datos vinculados, lo haría en series del estilo [John Wilbanks] [liderar] [departamento científico de Creative Commons], o [John Wilbanks] [poseer dirección de correo electrónico] [johnsemail@creativecommons.org], etcétera.

Dado que en el mundo existen varios John Wilbanks y que el término «liderar» cuenta con múltiples significados, cada uno de los elementos incluiría un hipervínculo hacia una fuente autorizada o clarificadora. Por ejemplo, [John Wilbanks] podría apuntar a su página de inicio, a la que le dedica Creative Commons o a la entrada sobre su persona en Wikipedia; [liderar] podría conducir a un vocabulario estándar que defina de qué tipo de liderazgo se trata. La estructura vinculada permitiría a los investigadores conectar datos procedentes de múltiples fuentes sin necesidad de acordar de antemano ningún modelo abstracto que especifique las relaciones entre las partes. Ello reduciría el coste de preparar los datos antes de enviarlos y aumentaría su valor una vez cursados.

El tratamiento de datos vinculados facilitaría que un mayor número de personas accediesen a ellos, lo cual aumentaría las probabilidades de descubrir correlaciones, formular hipótesis y construir modelos. El mundo exhibe tal complejidad, apunta Wilbanks, que la apuesta más segura para entenderlo —y evitar a tiempo una debacle económica, por ejemplo— consiste en someter la información al mayor número de análisis diferentes. Entre ellos se encontrarán sin duda los de instituciones con grandes talentos y modelos muy elaborados. Pero la condición primera y esencial para conseguir buenos resultados proviene de la contienda misma entre individuos a la hora de interpretarlos.

Tanto Wilbanks como Helbing aprecian el potencial transformador de las grandes cantidades de datos. Ambos albergan la esperanza de llegar a entender, desde un punto de vista científico, numerosos comportamientos sociales que hace tan solo unos años se antojaban inabarcables. Helbing explica que también FuturICT incorporará múltiples modelos que competirán entre sí y que, tras reunir la mayor colección de datos de la historia, planea poner su inmensa mayoría a disposición del público (si bien mantendrían su carácter privado aquellos protegidos por licencias comerciales o que contuviesen información personal).

No obstante, las diferencias entre ambos enfoques resultan palpables. Sobre la posibilidad de incluir diferentes modelos en FuturICT, Vespignani, el arquitecto de datos del proyecto, comenta: «Así sucede con las predicciones meteorológicas. Después, los modelos se combinan para deducir el resultado más probable». Es decir, para ellos la ventaja se encuentra en la convergencia hacia una respuesta única.

Por supuesto, la propuesta colaborativa de Wilbanks también busca la convergencia hacia la verdad. Pero, al tratarse de una infraestructura en la Red, reconoce e incluso estimula los desacuerdos beneficiosos. Pese a utilizar distintos modelos, taxonomías y nomenclaturas, los científicos podrán dialogar y, gracias a los hipervínculos que comparten, remontarse hasta una fuente común para poder cooperar. Las diferencias no se resolverán en un solo esquema universal de conversación, pues, como sostiene Wilbanks, habrá diferencias culturales, de puntos de partida y hasta de temperamento. Su planteamiento no solo reconoce, sino que admite e incluso defiende que las diferencias persistan.

¿QUÉ ES EL CONOCIMIENTO?

Por supuesto, la verdadera pregunta es: ¿qué enfoque dará mejor resultado? ¿Cuál hará progresar la ciencia en mayor medida y responderá con sensatez y precisión a los candentes interrogantes del futuro?

La respuesta podría depender de lo que entendamos por conocimiento. Desde hace dos milenios, la cultura occidental ha considerado el conocimiento como un sistema de verdades establecidas y coherentes. Pero puede que esa concepción se deba más a los medios de transmisión de ideas que a la naturaleza del conocimiento en sí; a un tipo de saber que se transmite y se preserva escrito en tinta sobre papel, que pasa por filtros institucionales y que no sufre alteraciones. Sin embargo, los medios digitales de hoy no consisten tanto en un sistema de publicaciones como en una gran comunidad interconectada. Podemos extraer grandes dosis de conocimiento gracias a las propuestas de datos vinculados, pero lo más probable es que el resultado se nos presente como una discusión continua sobre la manera en que ha sido obtenido. Desde luego, así es como se presenta el conocimiento en la era de Internet: nunca del todo establecido, nunca escrito por completo y siempre por terminar.

El proyecto FuturICT aspira a construir una imagen del mundo lo bastante completa como para que podamos hacerle preguntas y confiar en sus respuestas. Los datos vinculados, por otro lado, surgieron en parte como contrapunto a la posibilidad de representar con claridad el mundo a partir de modelos lógicos sobre los numerosos dominios de la vida. El conocimiento podría brotar de una «comunidad de datos» aun cuando esta no refleje el mundo a la perfección.

A menos, por supuesto, que la pura confusión de ideas constituya la imagen más fiel del mundo en que vivimos.

PARA SABER MÁS

La red semántica. Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila en *Investigación y Ciencia*, julio de 2001.

Too big to know: Rethinking knowledge now that the facts aren't the facts, experts are everywhere, and the smartest person in the room is the room. David Weinberger. Basic Books, 2012. **www.hyperorg.com/blogger**

Proyecto FuturICT: **www.futurict.eu**





Una estrategia similar a la empleada en las misiones robóticas permitiría enviar vuelos tripulados a los asteroides y a Marte

Damon Landau y Nathan J. Strange

Destinos posibles: Nuevas propuestas para los viajes tripulados a Marte incluyen visitas a un asteroide y al satélite Fobos.

PATRICK LEGER



Damon Landau es analista de misiones planetarias en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA. Colaboró en el diseño de la misión Juno a Júpiter, lanzada hace poco, y ha participado en la elaboración de los informes de la agencia sobre posibles misiones a asteroides.

Nathan J. Strange trabaja como arquitecto de misiones en el JPL. Formó parte del equipo de navegación de la misión Cassini-Huygens a Saturno y participó en los planes para explorar sus lunas. Ha investigado el diseño técnico de las futuras misiones tripuladas.*



En octubre de 2009, un grupo de entusiastas de la exploración espacial nos reunimos para estudiar a conciencia las posibilidades de enviar tripulantes humanos al espacio. El detonante de ese encuentro fue la comisión Augustine, un equipo de expertos convocados por el presidente Barack Obama para analizar la viabilidad de la lanzadera espacial y del proyecto que habría de sucederla. El panel había concluido que los planes de la NASA para llevar a cabo misiones tripuladas parecían seguir «una trayectoria insostenible». Tras haber trabajado en un fascinante programa de exploración robótica que ha ampliado los límites de la humanidad desde Mercurio hasta los confines del sistema solar, nos preguntábamos si podíamos hallar soluciones técnicas para algunas de las dificultades políticas y presupuestarias de la NASA.

Surgieron numerosas ideas: emplear propulsores iónicos para transportar los componentes de una base lunar; transferir energía a los vehículos robóticos situados en Fobos, la luna marciana; montar propulsores de efecto Hall de alta potencia en la Estación Espacial Internacional (ISS) y ponerla en una órbita que basculase entre la Tierra y Marte; situar con antelación motores químicos a lo largo de la trayectoria interplanetaria para que los astronautas pudieran emplearlos a su paso; utilizar cápsulas de exploración del estilo de las que aparecían en *2001: Odisea en el espacio*, en lugar de trajes espaciales; o, en vez de enviar humanos a un asteroide, traer uno de tamaño reducido a la estación espacial. Tras los cálculos, hallamos que un proyecto basado en la propulsión eléctrica (ya fuese por medio de motores iónicos o alguna técnica similar) reduciría en gran medida la masa de lanzamiento necesaria para enviar misiones tripuladas hacia Marte o un asteroide.

Salvo por el humo de los cigarrillos, aquello fue como regresar a la NASA de los años sesenta: hablábamos de lo que se hallaba dentro de nuestras posibilidades y evitábamos complicarnos con lo que no. Tras ese análisis inicial, y a modo de síntesis, improvisamos un seminario para nuestros compañeros del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA. Durante la primavera y el verano siguientes nos reunimos con otros expertos que habían mostrado interés por nuestros planteamientos, quienes nos propusieron mejoras. Nos informamos sobre los experimentos que habían realizado otros investigadores; desde ensayos con propulsores eléctricos de gran potencia hasta ligeros dispositivos solares muy eficientes. Desde entonces, nuestras discusiones han cobrado cierta entidad y se han incorporado a una corriente innovadora en la que participan miembros de la agencia y de la industria.

Como resultado, hemos combinado las propuestas más prometedoras con otras estrategias de eficiencia probada en un plan para enviar astronautas a 2008 EV5, un asteroide cercano a la Tierra, no más tarde de 2024. Este proyecto serviría como preparativo para un viaje posterior a Marte. Además, ha sido concebido para que encaje en el presupuesto actual de la NASA y, lo más importante, divide la empresa en una serie de hitos consecutivos, lo que proporcionaría la flexibilidad necesaria para adecuar el ritmo de la misión a la financiación disponible. En definitiva, el programa intenta aplicar a la exploración humana todo lo que hemos aprendido durante las expediciones robóticas.

PEQUEÑOS PASOS, UN SALTO DE GIGANTE

El informe de la comisión Agustine encendió una viva polémica que culminó con la decisión de delegar en empresas privadas el grueso de los vuelos orbitales tripulados [*véase* «Aerolíneas espaciales», por David H. Freedman; Investigación y Ciencia, febrero de 2011]. Ese plan defiende que la NASA se centre en la investigación necesaria para proporcionar un nuevo horizonte a la exploración humana del espacio. Pero ¿cómo avanzará la agencia sin el apoyo político y los recursos de los que disfrutaba en los días de las misiones Apolo?

EN SÍNTESIS

La nueva política espacial de EE.UU. ha puesto en duda el futuro de las misiones tripuladas a cargo de la NASA, que ahora debe subcontratar los vuelos orbitales.

Los autores han diseñado una propuesta innovadora que persigue garantizar un progreso lento pero constante en el programa de exploración humana de Marte.

Su estrategia se basa en una sucesión de proyectos escalonados que llevarían astronautas cada vez más lejos, sin comprometer la inversión tecnológica de la NASA.

**Las opiniones expresadas en este artículo corresponden únicamente a los autores; no son necesariamente las de la NASA ni las del JPL*

Más de un camino al espacio

En el pasado, las misiones tripuladas de la NASA han seguido una estrategia de «todo o nada»: se centraban en un objetivo y solo consideraban un medio para lograrlo. Pero el programa de exploración humana de Marte podría basarse en otra premisa: enviar misiones en fases escalonadas de complejidad creciente, como las que proponen los autores en su programa (*flechas verdes*) y sus variantes (*flechas azules*). Los destinos se representan aquí en orden aproximado de dificultad. Los vehículos de estas misiones podrían concatenar metas distintas o emplear otras técnicas cuando surgiesen problemas técnicos, políticos o financieros.



La exploración robótica se ha basado en una estrategia gradual de avances escalonados. Más que intentar alcanzar metas únicas desde una perspectiva de «todo o nada», se combinan técnicas para lograr toda una variedad de objetivos. Desde luego, el programa ha sido víctima de sus propios errores. Pero, al menos, no se estanca cuando sobrevienen cambios políticos ni cuando la innovación técnica se rezaga. Nuestra conclusión es que las misiones tripuladas podrían inspirarse en esa estrategia. No se necesita comenzar con «un salto de gigante», como hicieron las misiones Apolo. Antes bien, debería procederse en pasos modestos, cada uno sobre la base del anterior.

Para algunos, la verdadera lección de la exploración robótica es que deberíamos olvidar las misiones tripuladas. Si la única meta de la NASA fuese la investigación científica, las sondas robóticas resultarían sin duda más baratas y menos arriesgadas. Pero el cometido de la agencia va más allá de la mera investigación: la ciencia no representa sino un aspecto más del anhelo humano por ampliar horizontes. El poder de seducción que la exploración espacial ejerce sobre las personas obedece al deseo de estas de experimentarla, algún día, de primera mano. Las sondas robóticas solo constituyen una primera avanzadilla hacia el sistema solar. Después vendrán las misiones humanas, y luego serán los ciudadanos los que busquen fortuna y aventura en el espacio. En el pasado, la NASA invirtió en la tecnología que más tarde habría de alimentar la carrera espacial comercial que vivimos hoy, con cápsulas enviadas hacia la estación espacial y con los reactores que sobrevuelan el desierto de Mojave. Ahora, la NASA se encuentra en condiciones de desarrollar técnicas que nos lleven aún más lejos.

FLEXIBILIDAD

La línea de acción que nosotros recomendamos se rige por tres principios básicos. El primero consiste en asumir la doctrina de una «ruta flexible» propugnada por la comisión Agustine y aceptada por el presidente Obama y el Congreso. Esta estrategia reemplaza a la antigua insistencia en una ruta fija hacia la Luna y Marte por un amplio abanico de destinos. Comenzaríamos por los más próximos, como los puntos de Lagrange (posiciones en el espacio donde un objeto puede permanecer estacionario bajo la acción de dos fuerzas gravitatorias) y los asteroides cercanos a la Tierra.

Una ruta flexible reclama vehículos basados en nuevas técnicas, como la propulsión eléctrica. Nuestra propuesta incluye propulsores de efecto Hall (un tipo de motor iónico) alimentados por paneles solares. Un sistema similar impulsó la astronave *Dawn* hacia el asteroide gigante Vesta y, en 2015, la llevará hasta el planeta enano Ceres [*véase* «Cohetes eléctricos», por Edgar Y. Choueiri; Investigación y Ciencia, abril de 2009]. Mientras que los cohetes químicos tradicionales producen una potente pero breve descarga de gas, los motores eléctricos lanzan un chorro de partículas suave pero uniforme. La energía eléctrica aumenta el rendimiento de los motores, con lo que se consume menos combustible (piense en un «Prius espacial»). Como ese mayor rendimiento se debe a un empuje menor, algunas misiones se alargarían. Un error muy extendido afirma que la propulsión eléctrica resulta demasiado lenta para los vuelos tripulados. Sin embargo, la idea que surgió en nuestra primera reunión fue emplear remolcadores robóticos de propulsión eléctrica para situar cohetes propulsores en puntos clave de la trayectoria, como un reguero de migas de pan. Una vez emplazados, los astronautas podrán utilizarlos conforme pasasen junto a ellos. De esa manera, las misiones conseguirían economizar combustible gracias a los motores eléctricos, pero se beneficiarían también de la velocidad de la propulsión química.

Un aspecto clave de nuestro proyecto reside en el ahorro que proporciona la propulsión eléctrica. Dado que la nave no necesita acarrear tanto propulsante, su masa de lanzamiento total disminuye entre un 40 y un 60 por ciento. En una primera aproximación, el precio de una misión espacial aumenta de manera proporcional con la masa de lanzamiento. Así, al reducir esa masa a la mitad, el coste se abarataría en una proporción similar.

ILUSTRACIÓN DE PITCH INTERACTIVE, ADAPTADA DEL INFORME DE LA NASA SOBRE VUELOS TRIPULADOS; NASA (*Tierra, Luna y Marte*)

Muchos se preguntan por qué, siendo Marte el destino preferido por todos, proyectamos visitar un asteroide. La razón se debe a que estos encarnan el objetivo perfecto en un viaje a Marte concebido por etapas. Los hay esparcidos a miles en el camino entre la Tierra y Marte, lo que ofrece una sucesión de peldaños ideal. Dado lo reducido de la gravedad de un asteroide, aterrizar en uno de ellos requiere menos energía que hacerlo en la Luna o en Marte. Organizar una expedición interplanetaria de larga duración (de seis a dieciocho meses) ya supone una tarea bastante ardua, y más aún si debemos desarrollar vehículos para tomar tierra y despegar otra vez. Las misiones a los asteroides nos permitirían centrarnos en lo que, en nuestra opinión, plantea el problema más complejo —y aún sin resolver— a la hora de enviar astronautas lejos de nuestro planeta: protegerlos de los nocivos efectos de la gravedad cero y la radiación espacial [*véase* «Blindajes espaciales», por Eugene G. Parker; Investigación y Ciencia, mayo de 2006]. Conforme vayamos adquiriendo experiencia en las profundidades espaciales, podremos mejorar el diseño de los vehículos destinados a alcanzar la superficie marciana.

Una serie de vuelos de entre seis meses y un año y medio de duración permitirían visitar varios asteroides de interés científico con sistemas de propulsión eléctrica de 200 kilowatios (kW). Ello supondría un avance bastante aceptable con respecto a nuestra capacidad presente: en la actualidad, la ISS tiene instalados 260 kW de generación solar. Una misión así ya franquearía los límites del espacio profundo (las regiones situadas más allá de las órbitas terrestres altas), al tiempo que representaría un paso clave hacia los tiempos de vuelo de dos a tres años y los sistemas de 300 kW que se requerirán para explorar Marte.

El segundo principio de nuestro programa se basa en que las innovaciones técnicas necesarias para llevarlo a cabo no partirían de cero, como ocurría en la década de los sesenta. Algunos sistemas, sobre todo las medidas de protección contra la ausencia de gravedad y la radiación espacial, sí exigirán nuevas investigaciones. Pero todo lo demás procedería de dispositivos ya existentes. El vehículo de espacio profundo podría armarse a partir de elementos disponibles: la estructura, los paneles solares y los sistemas de soporte vital podrían adaptarse de diseños con los que ya cuenta la ISS. Y numerosas compañías privadas y las agencias espaciales de otros países disfrutan hoy de unos conocimientos y experiencia que la NASA podría aprovechar.

Nuestro tercer postulado se basa en diseñar un programa que resulte inmune a las dificultades y retrasos que pudieran surgir. Este principio debería aplicarse al elemento más debatido de la política espacial adoptada por el Congreso estadounidense: el vehículo de lanzamiento que deberá poner en órbita a la tripulación y las sondas exploradoras. El Congreso ha encomendado a la NASA la construcción de un nuevo cohete para grandes cargas, el Sistema para Lanzamientos Espaciales (SLS). Tal y como se anunció en septiembre pasado, la NASA planea desarrollar este vehículo por fases, a partir de una potencia de en torno a la mitad de la del Saturno V del programa Apolo, y progresar hasta superar la capacidad total de lanzamiento de ese cohete. El primer lanzador del SLS, junto con la cápsula *Orion*, cuya construcción ya ha comenzado, podría llevar astronautas hasta la órbita lunar y los puntos de Lagrange en viajes de tres semanas, pero no más allá.

Por fortuna, los viajes al espacio profundo no necesitan esperar hasta que el SLS esté terminado. Los preparativos podrían empezar ahora, con el desarrollo de los sistemas de soporte vital y de propulsión eléctrica necesarios para aventurarse más allá de la Luna. Si la NASA considerase tales sistemas como prioritarios, aumentarían las posibilidades de afinar la construcción del SLS para adecuarlo a las exploraciones futuras. Además, esos dispositivos podrían transportarse en lanzadores comerciales o internacionales, para ser ensamblados una vez en órbita, como se hizo con la ISS o la estación espacial Mir. El uso de cohetes ya existentes impulsaría el proyecto, a la vez que una agenda flexible permitiría a la NASA programar más exploraciones con un presupuesto cada vez más ajustado.

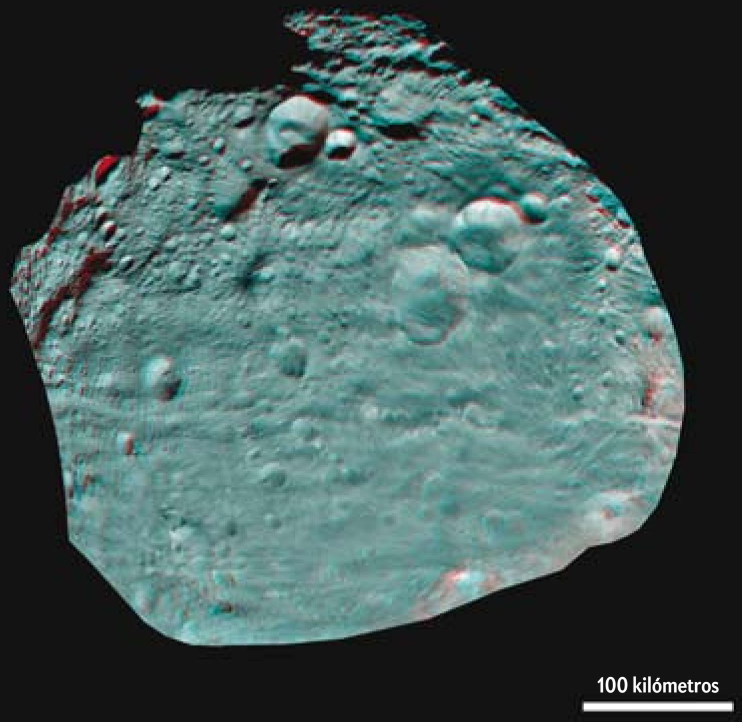
OBJETIVO: 2008 EV5

De acuerdo con nuestra propuesta, la NASA debería comenzar con la construcción del vehículo de espacio profundo. Un motor iónico de alimentación solar proporcionaría la tracción, y un nuevo hábitat de tránsito ofrecería un cobijo seguro a los astronautas. El vehículo de espacio profundo más básico se compondría de dos módulos que pudieran ser puestos en una órbita terrestre baja con un solo lanzamiento del menor de los nuevos cohetes del SLS de la NASA. Como alternativa, podrían servir tres cohetes ya disponibles, dos para los componentes del vehículo y otro para los suministros del viaje.

El viaje inaugural sería el más aburrido de todos. Durante dos años, una nave no tripulada comenzaría desde una órbita terrestre baja y cruzaría lentamente y en espiral los cinturones de radiación de Van Allen hasta llegar a una órbita terrestre alta. Un viaje sin problemas de propulsante, pero demasiado largo y radiactivo como para llevar tripulación a bordo. La astronave, una vez situada en el borde externo del pozo gravitatorio terrestre, sobrevolaría la Luna o efectuaría otras maniobras para retrazar la órbita y conseguir así una partida posterior más eficiente. Los astronautas ascenderían entonces desde tierra, impulsados por un cohete químico usual.

Como vuelo de prueba, los astronautas guiarían el vehículo hacia una órbita cuasiestacionaria sobre el polo sur de la Luna. Desde allí, podrían controlar una flota de exploradores robóticos e investigar la composición de los antiguos depósitos de hielo de los cráteres de la cuenca Aitken, en la cara oculta del satélite. Esta misión pondría a prueba las exploraciones de larga duración, con la seguridad que brinda tener la Tierra a pocos días de viaje. Cuando los astronautas retornasen a casa, el vehículo de espacio profundo permanecería en una órbita alta, a la espera de nuevos suministros y acondicionamiento para la primera misión hacia un asteroide.

Por lo que se refiere a dichas misiones, hemos considerado numerosas posibilidades. Algunas llevarían astronautas hasta los objetos de menor tamaño (menos de 100 metros de diámetro) que hay poco después de la Luna y los traerían de vuelta a la Tierra en menos de seis meses. Otras se aventurarían hacia objetos mayores (de más de un kilómetro), cercanos a Marte, y regresarían en dos años. Centrarse solo en misiones fáciles tal vez comprometiese el proyecto, pues podría llevar la investigación técnica hacia un callejón sin salida. Y al revés: empeñarse en misiones demasiado arduas podría retrasar de manera indefinida toda exploración de importancia, como consecuencia de fijar unas metas muy por encima de nuestras posibilidades. Nuestro punto de partida se sitúa entre ambos extremos: un viaje de ida y vuelta de un año de duración, proyectado para 2024 y cuyo objetivo consistiría en pasar 30 días en el asteroide 2008 EV5. Este objeto de casi 400 metros reviste un gran interés para algunos planetólogos: se trata de un asteroide de tipo C rico en carbono, que quizá sea una posible reliquia de la formación del sistema solar y acaso representativo de la fuente original de la materia orgánica terrestre.



El asteroide Vesta es el objetivo de la sonda robótica *Dawn*, de la que destacan sus motores iónicos. La nave se encuentra ahora en órbita alrededor del asteroide.

CORTESÍA DE NASA/JPL-CALTECH/UCLA/MPS/DLR/IDA

La manera más eficaz de llegar hasta allí consiste en aprovechar la gravedad terrestre por medio del efecto Oberth, el inverso a la maniobra de inserción en órbita que las sondas robóticas realizan de modo rutinario. Para prepararla, se equiparía el vehículo de espacio profundo con una etapa química de alto empuje, transportada desde la Tierra por medio de un remolcador de propulsión eléctrica. Ya instalada la etapa y la tripulación a bordo, el vehículo de espacio profundo se dejaría caer libremente desde las proximidades de la Luna hasta una distancia muy próxima a la atmósfera terrestre, donde alcanzaría una velocidad enorme. Justo entonces, se encendería la etapa de alto empuje y el vehículo se liberaría de la atracción terrestre en cuestión de minutos. Esta maniobra da los mejores resultados cuando se efectúa muy cerca de la Tierra, en el momento en que el vehículo se mueve a máxima velocidad, ya que la cantidad de energía que adquiere la nave resulta proporcional a la velocidad con la que se mueve en ese momento. El efecto Oberth constituye una excepción a la regla según la cual los motores iónicos son más eficientes que los cohetes químicos: se necesita un empuje muy potente y rápido para aprovechar al máximo el impulso proporcionado por la gravedad terrestre, y este solo pueden conseguirlo los cohetes de alto empuje. En comparación con un sistema basado en exclusiva en motores químicos, el viaje en espiral con motores iónicos y la maniobra basada en el efecto Oberth reduciría en un 40 por ciento el combustible necesario para escapar de la gravedad terrestre.

Una vez que los astronautas hubiesen escapado de la Tierra, se encenderían los propulsores de efecto Hall para impulsar el vehículo hacia su destino. Los motores iónicos dotarían a la misión de una gran versatilidad. Dado que proporcionan una velocidad uniforme, los planificadores podrían diseñar un buen número de trayectorias que permitiesen abortar la misión en caso de fallo (la misión robótica japonesa Hayabusa, encaminada hacia un asteroide cercano, logró superar varios percances gracias a su motor iónico).

Si los problemas técnicos o presupuestarios nos impidieran disponer del vehículo de espacio profundo a su debido tiempo para llegar al asteroide 2008 EV5, podríamos elegir otro objetivo. Del mismo modo, si nos topásemos con dificultades técnicas en el camino, podríamos improvisar. Si, por ejemplo, resultara demasiado difícil almacenar propulsantes de alto rendimiento en el espacio, consideraríamos emplear otros de menos prestaciones y revisaríamos la misión.

LAS VENTAJAS DE LAS CÁPSULAS

En nuestro proyecto, los astronautas dispondrían de un mes para explorar el asteroide y, en lugar de vestir trajes espaciales, emplearían cápsulas de exploración. Un traje espacial es, en esencia, un globo, por lo que el astronauta lucha constantemente contra la presión. Ello convierte los paseos espaciales en un trabajo farragoso y limita sus posibilidades. Una cápsula con brazos robóticos no solo resolvería el problema, sino que ofrecería espacio para comer y descansar. En ella, un astronauta podría desplazarse con rapidez de un sitio a otro durante varios días seguidos. La NASA ya está desarrollando un Vehículo de Exploración Espacial (SEV) que podría usarse como cápsula en un asteroide y que no sería difícil reconvertir en un vehículo de superficie para la Luna o Marte.

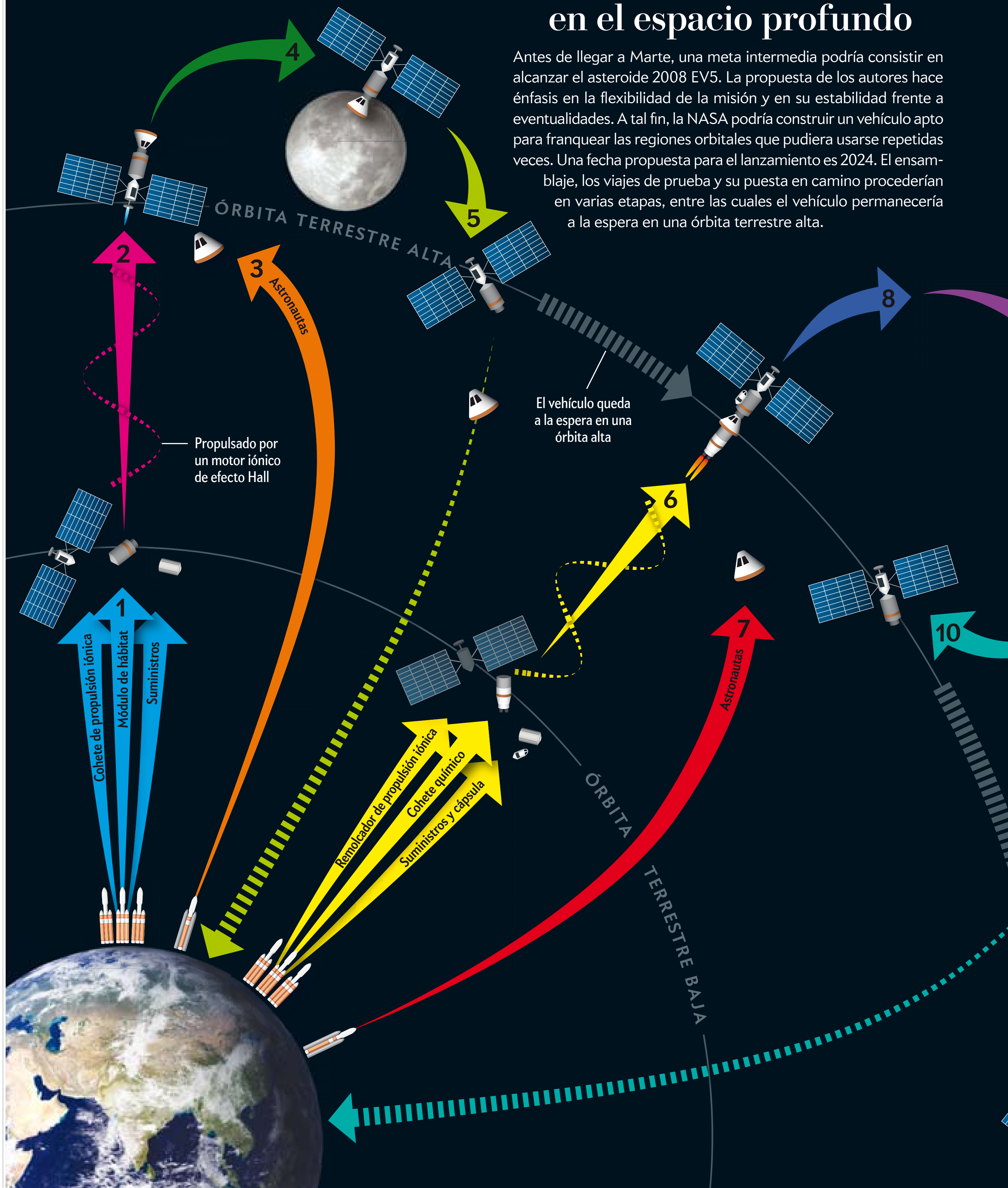
Los astronautas llevarían a cabo un reconocimiento completo en busca de afloramientos de minerales inusuales y otros lugares interesantes en los que cavar y encontrar muestras que pudieran datar de los primeros días del sistema solar. La NASA deberá enviar una tripulación mitad Indiana Jones, mitad Montgomery Scott: astronautas con formación científica, necesaria para localizar muestras valiosas, e ingenieril, imprescindible para solventar problemas técnicos sobre la marcha.

Transcurrido el mes, el vehículo de espacio profundo volvería a encender su motor iónico para iniciar una trayectoria de regreso de seis meses de duración. Pocos días antes de llegar a la Tierra, la tripulación treparía a una cápsula separada de la nave principal y se dispondría para el amerizaje. El vehículo de espacio profundo, vacío, permanecería en orbita en torno al Sol. Realizaría un vuelo de ajuste sobre la Tierra y continuaría impulsado por el motor iónico para rebajar su energía con respecto al sistema formado por la Tierra y la Luna, de modo que, al regresar a la Tierra un año después, pudiera hacer un vuelo de ajuste sobre la Luna para reentrar en una órbita terrestre alta y aguardar la siguiente misión. Su motor iónico y su módulo de hábitat podrían reutilizarse varias veces.

Una cadena de misiones a un asteroide debería producir mejoras paulatinas en los sistemas de soporte vital y de protección contra la radiación, lo que allanaría el camino hacia Marte. La primera misión al planeta rojo quizá no pusiese el pie en él, sino en sus lunas, Fobos y Deimos [*véase* «A Marte pasando por sus lunas», por Fred S. Singer; Investigación y Ciencia, mayo de 2000]. Una expedición tal sería muy similar a los viajes a los asteroides, solo que se alargaría durante un año y medio. A primera vista, puede parecer ridículo volar hasta Marte y no posarse sobre su superficie. Sin embargo, se trata de un objetivo complicado [*véase* «Otros desafíos en los viajes tripulados a Marte», por E. García Llama; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011]. Las misiones a los satélites permitirían a los astronautas adquirir la experiencia interplanetaria necesaria antes de enfrentarse al reto de aterrizar en Marte, explorarlo y regresar.

Adentrarse en el espacio profundo

Antes de llegar a Marte, una meta intermedia podría consistir en alcanzar el asteroide 2008 EV5. La propuesta de los autores hace énfasis en la flexibilidad de la misión y en su estabilidad frente a eventualidades. A tal fin, la NASA podría construir un vehículo apto para franquear las regiones orbitales que pudiera usarse repetidas veces. Una fecha propuesta para el lanzamiento es 2024. El ensamblaje, los viajes de prueba y su puesta en camino procederían en varias etapas, entre las cuales el vehículo permanecería a la espera en una órbita terrestre alta.



1 Dos módulos (el motor iónico de alimentación solar y el hábitat de tránsito) se lanzan por separado hacia una órbita terrestre en cohetes ya disponibles, como el Delta IV Heavy. Los módulos se ensamblan por control remoto desde tierra. En un tercer lanzamiento se envían los suministros para el viaje.

2 Un motor iónico carece de la potencia necesaria para escapar de la órbita terrestre, pero guiará la nave poco a poco hacia una órbita alta. Para evitar una exposición tan prolongada a la radiación, aún no habrá astronautas a bordo.



3 Cuando la nave haya alcanzado una órbita muy alta los astronautas subirán hasta ella en un pequeño cohete rápido.

4 Para poner la astronave en rumbo, los astronautas la sitúan en una órbita lunar. Aunque se trataría de un viaje de prueba, los astronautas podrían llevar a cabo varias labores científicas de interés.

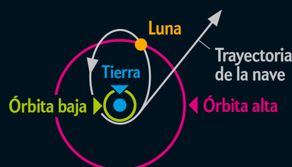
5 Tras un vuelo de pruebas de unos seis meses, los astronautas colocan de nuevo la nave en una órbita terrestre alta. Luego regresan a la Tierra en una cápsula que amerizará en el océano.

Asteroide 2008EV5

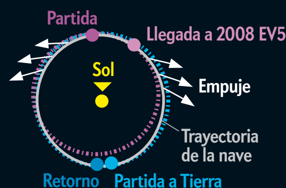
6 Como preparación al escape de la órbita terrestre se envían más suministros y un pequeño cohete químico auxiliar en un remolcador interorbital de propulsión iónica.

7 Una vez ensamblada la etapa química al vehículo de espacio profundo, una nueva tripulación llega a él en un cohete químico, al igual que antes.

8 El vehículo de espacio profundo se sitúa en una órbita muy elíptica. Al llegar al punto más próximo a la Tierra (aquel en el que cae a mayor velocidad) enciende la etapa química. Esta maniobra lo pone rumbo al asteroide.



9 El motor iónico comienza a impulsar a la nave hacia su primer objetivo, el asteroide 2008 EV5. El vuelo de ida dura seis meses y, durante un mes, la tripulación explora el asteroide en cápsulas robóticas.



10 La nave enciende el motor iónico y pone rumbo a casa. Al cabo de seis meses, la tripulación ameriza en la misma cápsula que empleó para salir. La nave es reconducida hacia una órbita terrestre alta, donde espera su próxima misión.

ILUSTRACIÓN DE PITCH INTERACTIVE; NASA (*Tierra y Luna*)

Ya se han presentado varias tácticas para aumentar la flexibilidad y minimizar el coste de una misión a la superficie de Marte. Las más convincentes proponen disponer con antelación hábitats y sistemas de exploración sobre la superficie del planeta para que los astronautas ya cuenten con ellos una vez lleguen. Ese equipamiento podría enviarse en naves (iónicas) lentas. Una vez emplazado, el propulsante podría generarse allí mismo destilando el dióxido de carbono de la atmósfera marciana y mezclándolo con hidrógeno traído desde la Tierra para generar metano y oxígeno; o, quizá, por electrólisis del permafrost, para producir hidrógeno y oxígeno líquidos. Al enviar un cohete de retorno vacío que pueda repostar en Marte, la masa que habría que lanzar desde la Tierra se reduciría de manera espectacular [*véase* «A Marte sin escalas», por Robert Zubrin; Investigación y Ciencia, mayo de 2000].

El movimiento relativo de la Tierra y Marte ofrece a los astronautas del orden de un año y medio (terrestre) en la superficie marciana antes de que los planetas vuelvan a alinearse, por lo que dispondrían de tiempo de sobra para todo tipo de investigaciones. Al final de su estancia, abordarían un vehículo de lanzamiento lleno del combustible fabricado en Marte y despegarían hacia una órbita marciana, donde se encontrarían con uno de los vehículos de espacio profundo de las campañas a los asteroides con el que regresarían a la Tierra. Ese vehículo incluso podría situarse en una trayectoria cíclica de vaivén entre la Tierra y Marte, catapultado sin coste energético por efecto de la gravedad [*véase* «Autobús interplanetario», por James Oberg y Buzz Aldrin; Investigación y Ciencia, mayo de 2000].

Incluso con el emplazamiento previo de parte del equipo, un aterrizador marciano y un cohete de retorno sumarían una masa enorme, por lo que necesitarían el mayor de los lanzadores SLS. Sin embargo, las primeras misiones de espacio profundo constarían de componentes de menor tamaño que sí podrían despegar con el primero de los SLS, o incluso con cohetes ya existentes. La estrategia de proceder paso a paso que proponemos maximizaría la versatilidad del programa y permitiría a la NASA concentrarse en la resolución de los problemas realmente complejos, como la protección contra las radiaciones.

La NASA se encuentra ahora ante una de las mejores oportunidades para reinventarse y desarrollar nuevos vehículos interplanetarios. El mayor obstáculo no es técnico, sino imaginar cómo hacer más con menos. Con una campaña planteada en etapas y misiones con miras cada vez más elevadas, los vuelos tripulados podrían romper las amarras con las órbitas terrestres bajas por primera vez en 40 años. Con ello, daría comienzo la era espacial más fascinante de todas las vividas hasta ahora.

PARA SABER MÁS

Plymouth rock: An early human mission to near Earth asteroids using Orion spacecraft. J. Hopkins et al. Presentado en la Conferencia y Exposición Espacio 2010 de la AIAA, 30 de agosto-2 de septiembre de 2010. **tinyurl.com/PlymouthRockNEO**

Target NEO: Open global community NEO workshop report. Taller realizado en la Universidad George Washington el 22 de febrero de 2011. Editado por Brent W. Barbee, 28 de julio de 2011. **www.targetneo.org**

Near-Earth asteroids accessible to human exploration with high-power electric propulsion. Damon Landau y Nathan Strange. Presentado en la Conferencia de Especialistas en Astrodinámica de la AAS/AIAA, Girdwood (Alaska), 21 de julio-4 de agosto de 2011. **tinyurl.com/ElectricPath**

300-kW solar electric propulsion system configuration for human exploration of near-Earth asteroids. J. R. Brophy et al. Presentado en la 47.ª Conferencia y Exhibición de Propulsión Conjunta de la AIAA/ASME/SAE/ASEE, San Diego, 31 de julio-3 de agosto de 2011. **tinyurl.com/300kWSEP**

BIOLOGÍA

MINIATURAS DESLUMBRANTES

Bajo el microscopio se percibe la grandeza de los mundos pequeños

Gary Stix

La microscopía sigue representando una de las pocas áreas de la ciencia en la que los aficionados pueden hacer que otros se interesen por su trabajo. Con su esfuerzo reiterado, obtienen fotografías asombrosas de organismos y objetos diminutos que el ojo humano no puede captar. Esta fuente inagotable de imágenes microscópicas llegó mucho antes del invento del teléfono móvil y de las comunicaciones en red. Ya hace tiempo que el aficionado ha puesto al descubierto un mundo nuevo con el microscopio: en los primeros años, dibujando a mano las imágenes que aparecían bajo el objetivo; en tiempos más recientes, con el realismo añadido que la fotografía proporciona.

Esa noble tradición continúa en nuestras páginas, en las que presentamos una selección de fotografías del concurso de imágenes digitales de biopaisajes organizado por Olympus (Olympus BioScapes International Digital Imaging Competition), una oportunidad excepcional para los aficionados y los científicos que desean mostrar sus habilidades fotográficas. Entre los concursantes de este año figura un microscopista *amateur* que hizo un descubrimiento mientras caminaba por una montaña de Grecia. Otro participante, un biólogo celular, utilizó un microscopio avanzado que había adquirido en una subasta para fotografiar el esqueleto de un organismo del zooplancton. Aunque la imagen captada no guardaba relación con su trabajo, le sirvió para inmortalizar la belleza estructural del esqueleto. Contemple el lector los vívidos colores y la intrincada geometría de estos seres liliputienses que muy rara vez tenemos la posibilidad de ver.



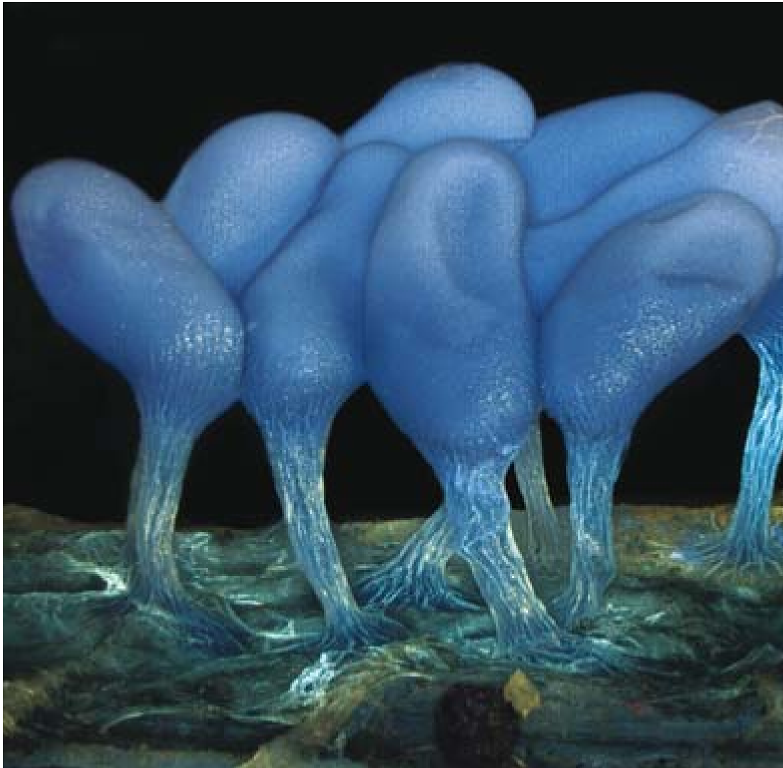
Huevos de chinche de bosque. El fotógrafo aficionado Haris S. Antonopoulos descubrió estos huevos, de 1,2 milímetros de diámetro, en la cumbre de una montaña cerca de Atenas. Obtuvo de ellos una serie de imágenes que combinó mediante un programa de retoque de fotografías. Los halos blancos delimitan las tapas circulares por las que surgen las ninfas.



▲ **Pata de díptero.** Sección de la pata de una hembra de mosca de la familia de los sírfidos, de varios cientos de micras de diámetro; presenta dos pulvilos, unas estructuras adhesivas que permiten al insecto pegarse a las superficies. Los pulvilos, que aquí aparecen como apéndices grandes de color anaranjado en la parte superior, en forma de V, se hallan conectados a la pata mediante un sistema de amortiguación (*áreas azules*), constituido principalmente por la proteína resilina. Jan Michels, de la Universidad de Kiel, realizó la fotografía de *Eristalis tenax* como parte de un estudio sobre el potencial de la microscopía confocal de barrido láser para proporcionar imágenes tridimensionales de partes del cuerpo de insectos que contienen resilina.

▶ **Cola de escorpión erizada.** Esta vaina delgada y retorcida, de cinco centímetros de longitud, recuerda la cola de un escorpión. De ahí el nombre del género de la planta que la produjo, el granillo de oveja (*Scorpiurus muricata*). Viktor Sýkora, de la primera facultad de medicina de la Universidad Carolina de Praga, realiza microfotografías de plantas como pasatiempo, y ha publicado un libro sobre el tema.





◀ **Mohos mucilaginosos.** La radiación ultravioleta hace que los cuerpos fructíferos de estos mixomicetos, o mohos mucilaginosos, brillen con un aura fantasmagórica. Dalibor Matýsek, mineralogista de la Universidad Técnica de Ostrava y aficionado a fotografiar objetos biológicos, combinó mediante la superposición de imágenes más de 100 fotos escaneadas. Obtuvo una representación tridimensional de este mixomiceto (*Arcyria stipata*), de 4,4 milímetros de altura.

▼ **Rotífero.** Dos lóbulos de la corona del rotífero *Floscularia ringens*, de 300 micras de amplitud, emergen de un tubo protector. Los cilios del borde de la corona se mueven siguiendo una pauta ondulatoria, rápida y uniforme, denominada onda metacrónica. Se crean así corrientes de agua que atraen el alimento hacia la boca del rotífero. El tubo está constituido por pellas circulares de color pardo rojizo que el rotífero forma en un alvéolo tapizado de cilios. En el centro de esta fotografía, que obtuvo el primer premio del concurso y fue tomada por Charles Krebs de Issaquah (Washington), se observa la formación de una nueva pella. Una vez esta alcanza el tamaño adecuado, el rotífero se retrae dentro de su tubo y, al hacerlo, superpone con rapidez y esmero la nueva pella en el borde superior del tubo.



Célula inmunitaria. Ante la percepción de una sustancia extraña, un mastocito se ha infiltrado en la superficie del ojo. Los mastocitos, que contienen vesículas de histamina (*motas rojas*), figuran entre las células del sistema inmunitario que primero responden, atrayendo a otras células inmunitarias al lugar de una infección. Aquí, la liberación de histamina ayuda a separar las fibras de colágeno a través de las que avanza el mastocito. Donald W. Pottle, del Instituto de Investigación Ocular Schepens, de Boston, tomó esta fotografía mediante un microscopio confocal.



▲ **Vieira de la bahía.** Kathryn R. Markey siente fascinación por los ojos de las conchas de peregrino. De modo que obtuvo un ejemplar juvenil del vivero de marisco de Luther H. Blount, en la Universidad Roger Williams de Bristol, en Rhode Island, para mostrar al resto del mundo los majestuosos ojos del molusco: círculos con aspecto de arándanos en el borde del manto de ambas valvas. Este ejemplar de *Argopecten irradians* se colocó bajo un estereomicroscopio del Laboratorio de Diagnóstico Acuático de la universidad, donde trabaja Markey, para obtener la fotografía.

◀ **Esqueleto de radiolario.** Los radiolarios, animales unicelulares parecidos a amebas que viven en los océanos de todo el mundo, presentan prominencias dispuestas radialmente, los axopodios, que aquí se asemejan a botones. Los axopodios ayudan a estos organismos a flotar y a ingerir la comida. Para producir la imagen de este esqueleto de radiolario de 120 micras de longitud, Christopher B. Jackson, de Ikelos, en Suiza, tomó 15 fotografías con un microscopio óptico, cada una de ellas con un plano focal diferente. Después las combinó para conseguir una imagen nítida.

PARA SABER MÁS

Concurso de imágenes digitales de biopaisajes de Olympus: **www.olympusbioscapes.com**

por Agustí Nieto-Galan



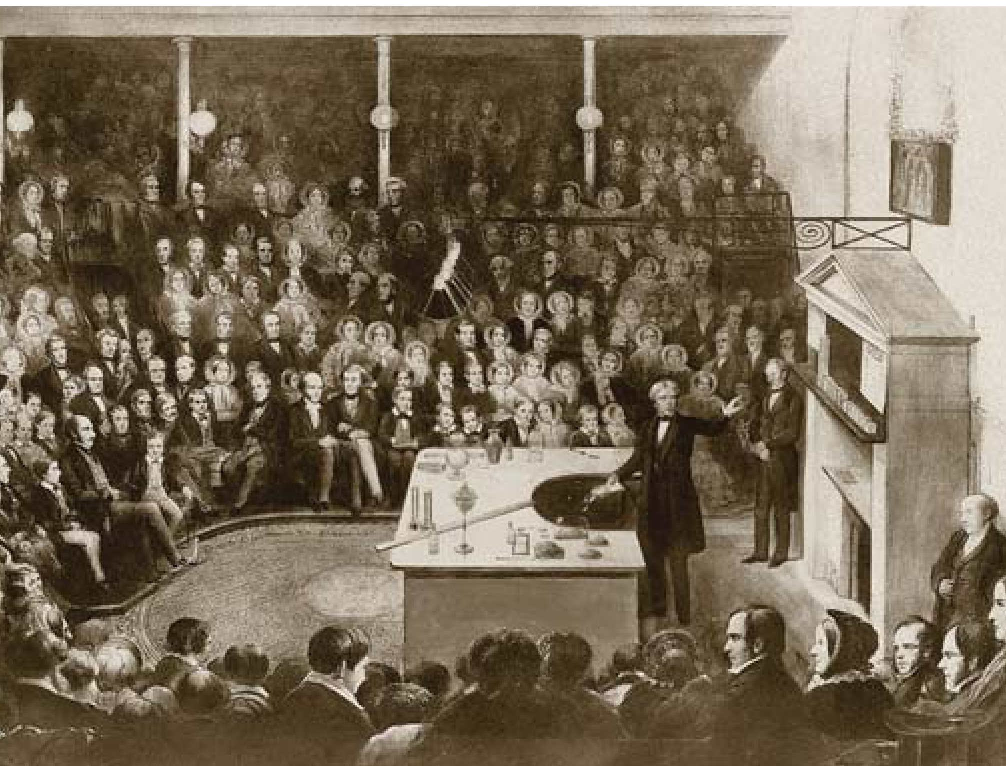
Agustí Nieto-Galan, profesor de historia de la ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), es investigador ICREA-Academia y director del Centro de Historia de la Ciencia de la UAB.

Ciencia popular

La historia de la ciencia nos ayuda a comprender mejor la comunicación entre expertos y profanos

En 1686, Louis-Bernard de Fontenelle (1657-1757) publicó con gran éxito *Entretiens sur la pluralité des mondes*, un libro que se reeditaría hasta bien entrado el siglo. El que había de ser nombrado en 1697 secretario perpetuo de la Academia de las Ciencias de París, una de las principales instituciones científicas del siglo xvii, escribió un diálogo entre un filósofo natural cartesiano y una dama inteligente, pero considerada profana en aquellos temas. Fontenelle le explicaba los sistemas de Ptolomeo, Copérnico y Brahe, los planetas, los satélites y las estrellas mientras discutía con ella la posibilidad de que otros mundos estuvieran habitados. En un principio, había pensado aquel libro para reducidos círculos de la aristocracia parisina, pero el éxito de ventas le obligó a revisar el texto y a adaptarse progresivamente a las necesidades del lector en futuras ediciones.

Esa es una historia relativamente poco conocida. Al situarnos en las últimas décadas del siglo xvii, a menudo esperamos que nos hablen de grandes filósofos naturales ingleses, como Robert Boyle e Isaac Newton, o de genios continentales como René Descartes, Pierre Gassendi o el mismo Gottfried Wilhelm Leibniz. No contamos en cambio demasiado con la presencia de Fontenelle entre los grandes de la historia de la ciencia, y mucho menos con la de esa enigmática dama que le escuchaba con atención y conversaba con él sobre arriesgadas hipótesis planetarias. ¿Existían diferencias considerables entre el sistema solar que Newton había descrito en sus *Principia*, la versión más «popular» de Fontenelle y los conocimientos de la dama? ¿Es posible definir una frontera nítida entre esos tres niveles de conocimiento científico, o se trata más bien de un contínuum de saberes que se realimentan mutuamente? ¿Hasta qué punto la ciencia o la filosofía natural de los expertos de finales del siglo xvii era incompatible con la filosofía natural popular, de los profanos? ¿Se podría extender esta discusión a otras épocas históricas?



Michael Faraday (1791-1867) en una conferencia pública celebrada en el anfiteatro de la Real Institución de Gran Bretaña, en Londres, c. 1856. Litografía de Alexander Blaikley (1816-1903).

Esas parecen preguntas difíciles, reservadas a la labor paciente y rigurosa del historiador y en apariencia alejadas de los problemas de la comunicación científica en nuestras sociedades contemporáneas. De forma paradójica, acudimos a la historia cuando intentamos comprender cuestiones políticas, económicas o sociales del presente; recurrimos a la historia de la ciencia para enseñar o comunicar aspectos importantes de nuestra ciencia contemporánea, pero no pensamos en la historia de Fontenelle y de tantos otros cuando se trata de reflexionar sobre el papel de la comunicación científica en nuestro presente. La misma revista en la que se publica este breve artículo tiene su propia historia, sus retos particulares para establecer puentes entre expertos y profanos, sus protagonistas (divulgadores, científicos, editores, lectores, etcétera) que a lo largo de los años han configurado su propio estilo. ¿Por qué no abundar entonces en la propia historia de la comunicación científica para enriquecer el debate sobre nuestra cultura científica contemporánea?

Existe hoy un lamento generalizado sobre la excesiva distancia que separa el

conocimiento científico experto del popular, o la que separa a la ciencia oficial y ortodoxa, de las llamadas «pseudociencias» o prácticas consideradas heterodoxas. Además, a pesar de los grandes esfuerzos invertidos en la educación científica de la población, sobre todo durante la segunda mitad del siglo, numerosos testimonios ponen en evidencia la supuesta «ignorancia» científica del público, así como la falta de integración de las ciencias naturales como parte intrínseca de la cultura. Como denunciaba hace ya unos años la filósofa e historiadora Bernadette Bensaude-Vincent es como si la progresiva profesionalización y especialización de la ciencia a lo largo de los siglos XIX y XX hubiera creado, paradójicamente, una especie de barrera infranqueable entre los expertos y profanos, que los grandes programas de divulgación habrían incluso reforzado. No existen obviamente soluciones mágicas para este complejo problema cultural, pero la falta de conocimiento histórico sobre los procesos de comunicación científica en el pasado ha contribuido a empobrecer el debate. Ha dejado el problema en manos de científicos profesionales y divulgadores, mayoritariamente educados en la cultura de las ciencias experimentales, pero a menudo alejados del conocimiento histórico y de la cultura humanística en general.

Rescatando del olvido a otros muchos personajes como Fontenelle y su dama, un grupo numeroso de historiadores de la ciencia ha intentado en las últimas décadas reconstruir la historia de la comunicación científica y aportar así nuevos elementos para el debate. Ante un cierto desprecio por la cultura científica popular o por la llamada a veces de forma despectiva «ciencia popular» o «pseudociencia», la historia nos proporciona lecciones inesperadas. Hoy sabemos, por ejemplo, que las clases de anatomía que incluían la disección de un cadáver fueron prácticas públicas habituales desde el Renacimiento hasta bien entrado el siglo XIX; que durante siglos se realizaron experimentos de física y de química espectaculares en los mismos teatros que al día siguiente albergaban otro tipo de representaciones artísticas; que a pesar de las críticas de los académicos, miles de pacientes se sometían a terapias de magnetismo animal a finales del siglo XVIII, o asistían a lecciones y demostraciones de una extraña ciencia llamada frenología a lo largo del siglo XIX; que algunas de las grandes figuras de nuestro panteón actual de sabios, como Michael Faraday o el mismo Charles Darwin, no eran más que *amateurs* de su tiempo, alejados de carreras universitarias, con itinerarios intelectuales muy creativos, pero heterodoxos, que necesitaban a menudo el calor de un público supuestamente profano, pero capaz de discutir con rigor determinadas ideas sobre el origen de la vida o la naturaleza de la electricidad y el magnetismo.

La historia de la ciencia nos ha proporcionado también investigaciones muy precisas sobre el papel de la enseñanza en la propia formación del conocimiento científico. Al igual que Fontenelle con su dama, de manera análoga a las tertulias en los salones aristocráticos de la Ilustración o en los cafés de las ciudades industriales del siglo XIX, la historia de la enseñanza de la ciencia es la historia de un continuo diálogo entre profesores y alumnos, de intersecciones complejas entre libros y apuntes, en laboratorios de prácticas y aulas, en las que, como diría el sociólogo de la ciencia Richard Whitley, el conocimiento se expone y se contrasta continuamente, y condiciona así los cimientos intelectuales del joven científico, todavía profano pero futuro experto. Sabemos que, entre los grandes nombres de la ciencia había también «malos» estudiantes (pensemos en Svante Arrhenius o Albert Einstein), prueba inequívoca de la complejidad del proceso educativo y de su resultado.

¿Es posible definir una frontera nítida entre el conocimiento científico y el popular?

Investigaciones sobre épocas más recientes, centradas en el siglo XX, han demostrado el modo en que los medios de comunicación de masas contemporáneos han desempeñado una función relevante en la elaboración de conocimiento científico, más allá de la simple difusión de los últimos descubrimientos. Seguramente algunos lectores recordarán el ejemplo de la llamada fusión fría, con la famosa rueda de prensa del 23 de marzo de 1989, en la que Martin Fleischmann y Stanley Pons, científicos de la Universidad de Utah en Salt Lake City, anunciaban haber llevado a cabo una fusión nuclear a partir de una electrolisis de agua pesada (D_2O). La noticia llevó a numerosos laboratorios a embarcarse en la replicación de ese controvertido experimento antes de su publicación en las revistas especializadas. Otros estudios recientes han demostrado que ciertos debates paleoantropológicos sobre los orígenes del hombre o discursos ecológicos controvertidos como la hipótesis Gaia necesitan de los medios y de la esfera pública para su propia legitimación más allá de los artículos académicos.

Abundando en el carácter «popular» de la ciencia, algunos investigadores incluso sugieren que estamos asistiendo a la emergencia de una nueva ciencia «democrática», en la que el ciudadano ya no puede ser tratado de manera displicente por su supuesta ignorancia científica, sino que, como ya ocurrió de formas diversas en el pasado, emerge como un público epistemológicamente activo con capacidad de condicionar determinadas líneas de investigación médica, proyectos ambientales o grandes obras públicas. Ahora ya no se trataría de la noble dama que dialogaba con Fontenelle en los *Entretiens*, sino de millones de hombres y mujeres que no se resignan a su papel como profanos o ignorantes científicos, en un mundo en el que la frontera entre lo académico y lo popular, entre lo experto y lo profano, entre lo científico y lo social se diluye de forma progresiva.

Esas son obviamente ideas no exentas de controversia, pero creo sinceramente que no podemos permitirnos el lujo de analizar y vivir el complejo presente de la comunicación científica sin tener en cuenta las lecciones del pasado que nos proporciona la historia de la ciencia.

PARA SABER MÁS

Expository science. Forms and functions of popularization. Dirigido por T. Shinn y Richard Whitley. Reidel, Dordrecht, 1985.

L'opinion publique et la science. A chacun son ignorance. B. Bensaude-Vicent. Institut d'édition Scenofi-Synthélabo. París, 2000.

Panorama general de la ciencia moderna. P. J. Bowler, I. Rhys Morus. Crítica, Barcelona 2007 (ed. original en inglés, Chicago 2005). Capítulo 16: «Ciencia popular», pp. 463-493.

Los públicos de la ciencia. Expertos y profanos a través de la historia. A. Nieto-Galan. Marcial Pons, Madrid, 2011.

por Berta Martín-López

Berta Martín-López es investigadora del Laboratorio de Socio-ecosistemas en el departamento de ecología de la Universidad Autónoma de Madrid.



De linces y hongos

Las políticas de conservación de la biodiversidad no se centran en las especies más importantes, sino en las más carismáticas

En otoño del año 2010 tuvo lugar en Nagoya la X Conferencia de las Partes del Convenio de Diversidad Biológica. Se esperaba que los 193 países firmantes del acuerdo informasen de haber alcanzado el objetivo de parar las tasas de extinción de la biodiversidad. Sin embargo, dicho encuentro se convirtió en la crónica anunciada del incumplimiento de ese compromiso. Tras dicha reunión, las Naciones Unidas declararon el actual Decenio de la Diversidad Biológica (2011-2020), con el propósito de que la sociedad y los gobiernos se comprometan a luchar por la conservación de la biodiversidad. El hecho de embarcarnos en esta iniciativa debería hacernos reflexionar sobre cuán acertadas han sido las políticas de conservación aplicadas hasta la fecha y hacia dónde deberían orientarse las futuras.

Desde los años setenta del siglo pasado, la biodiversidad y, más concretamente, determinados grupos taxonómicos (mamíferos y aves) se han alzado como iconos de los programas de conservación. En España, entre 2003 y 2007 se destinaron a estos grupos de especies más del 75 por ciento de los presupuestos de conservación, de los cuales, más del 50 por ciento se dedicó a unos pocos mamíferos y aves rapaces. De hecho, la decisión de conservar este número reducido de especies parece estar legitimada por la sociedad, cuyo interés por proteger la biodiversidad recae exclusivamente en las especies carismáticas.



Nuestra afinidad innata por determinados seres vivos viene determinada por factores emotivos como la proximidad filogenética de los mismos al ser humano o la semejanza física con nuestros recién nacidos (formas redondeadas, frentes abultadas u ojos grandes). El etólogo Konrad Lorenz ya explicaba en 1950 el mecanismo por el cual el ser humano establece lazos afectivos con animales de aspecto infantil. Ello resulta positivo, puesto que favorece que la sociedad apruebe y promueva la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, aumenta el riesgo de que tan irracionales criterios acaben rigiendo las políticas de conservación de especies (los actuales presupuestos de conservación de vertebrados muestran cierta relación con caracteres morfológicos que recuerdan a nuestros bebés).

¿Podemos esperar que se conserven las especies mediante la aplicación de criterios meramente afectivos o emocionales, en vez de racionales o científicos? En este punto, surgen otras interesantísimas preguntas: ¿dónde empieza el sesgo, en la política o en la propia actividad científica? ¿Las estrategias de conservación no responden a criterios científicos o es que la información científica se encuentra también sesgada hacia determinados grupos de especies? Más del 50 por ciento de los artículos científicos publicados se centran en aves y mamíferos, aunque estos grupos representen solo menos del 2 por ciento de las especies conocidas en España. Si bien es cierto que son más fáciles de estudiar y monitorizar que los invertebrados o los hongos, no podemos aspirar a conservar la biodiversidad si conocemos solo menos del 2 por ciento de la misma.

Tanto las decisiones políticas como la opinión pública acerca de la conservación vienen determinadas sobre todo por la información existente, bien porque se use conocimiento científicamente validado en la toma de decisiones, bien porque se divulgue dicha información a la sociedad. No podemos conservar lo que no se conoce y no podemos pretender que la sociedad solicite conservar lo que nadie le ha dado a conocer.

¿Podemos aspirar a detener las actuales tasas de erosión de la biodiversidad destinando elevados porcentajes de presupuesto público de conservación e investigación a menos del 2 por ciento de las especies conocidas? Nos encontramos en un bucle de realimentación positiva donde solo unas pocas especies de aves acuáticas, rapaces y mamíferos se consideran prioritarias a nivel político, científico y social. Sin embargo, no son precisamente estas especies carismáticas las responsables del mantenimiento de la mayoría de los procesos ecológicos de los cuales dependen los servicios que la biodiversidad suministra a la sociedad humana. La polinización, la fertilización del suelo, el control de la erosión o la depuración del agua no dependen principalmente de los mamíferos ni de las aves, sino de microorganismos, plantas o invertebrados, grupos que despiertan escaso interés político, científico y social. Así pues, invertir la mayor parte de los recursos en los grandes vertebrados no solo pone en riesgo la conservación de la biodiversidad, sino también el flujo de servicios de ecosistemas de los cuales depende el bienestar de la sociedad.

En este Decenio de la Diversidad Biológica deberíamos empezar por celebrar y reconocer la diversidad de vida existente en nuestros ecosistemas. Para ello, necesitamos que desde la ciencia y la divulgación se haga visible —tanto para los políticos como para los ciudadanos— el importante papel que desempeñan los grupos tradicionalmente olvidados e ignorados (microorganismos, plantas e invertebrados) en el funcionamiento de los ecosistemas y en el suministro de servicios ecosistémicos a la sociedad.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA** Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA** Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION** Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA** Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA** Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS** Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA** El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES** Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS** Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA** La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos	
España: 2,80€	Otros países: 14,00€
Oferta Colección BSA	
España: 7,00€	Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es



NEUROCIENCIA

Interruptores ocultos en la mente

Mediante cambios epigenéticos que activan o desactivan genes, la experiencia puede influir en las enfermedades mentales

Eric J. Nestler

Matt es profesor de historia. Su hermano gemelo, Greg, es drogadicto. (Los nombres se han cambiado para proteger el anonimato.) Durante los años de juventud, transcurridos en Boston, ambos pasaron con éxito los ciclos de educación media: eran buenos estudiantes y deportistas, y se llevaban bien con sus compañeros. Como muchos jóvenes, de vez en cuando los hermanos tomaban cerveza o fumaban cigarrillos a escondidas. También experimentaron con la marihuana. Más tarde, en la universidad, probaron la cocaína. A Greg, la experiencia le desbarató la vida.

FOTOGRAFÍA DE PLAMEN PETKOV

Eric J. Nestler es profesor de neurociencia y director del Instituto Friedman del Cerebro en el Centro Médico Monte Sinaí de Nueva York. Centra su investigación en los mecanismos moleculares de la drogadicción y la depresión.



Al principio llevaba una vida normal. Asistía a clase y mantenía el contacto con sus amigos. Pero la droga se convirtió pronto en algo de suma importancia. Greg abandonó la escuela y aceptó varios puestos de trabajo precarios. Raras veces mantenía un empleo durante más de uno o dos meses, ya que lo despedían por faltar al trabajo o discutir con los clientes y compañeros. Su comportamiento se hizo cada vez más imprevisible, a veces violento, y fue detenido varias veces por robar para costearse la droga. Fracasó en los múltiples intentos de rehabilitarse y, a los 33 años de edad, cuando un juez le mandó a un centro psiquiátrico para que fuera evaluado, era ya indigente y vivía en la calle. Había sido repudiado por su familia y era prisionero de su adicción.

¿Qué hizo a Greg tan susceptible a la cocaína, hasta el punto de que destruyera su vida? ¿Y cómo fue que su hermano gemelo, con quien comparte los mismos genes, se librara de tal destino? ¿Por qué la exposición a una droga significa para algunos una vida entera de adicción, mientras otros superan sus imprudencias juveniles y siguen adelante llevando una vida productiva?

Esas preguntas no son nuevas, pero al fijarse en hallazgos de otras disciplinas, los neurocientíficos han comenzado a adoptar un nuevo enfoque para intentar resolverlas. Durante el último decenio, los biólogos que estudian el desarrollo embrionario y el cáncer han descrito numerosos mecanismos moleculares en los que el ambiente determina el comportamiento de los genes sin cambiar la información que contienen. En vez de mutar genes, estas modificaciones epigenéticas los marcan de tal manera que alteran su actividad, en algunos casos, durante toda la vida.

Mi laboratorio y otros estamos descubriendo ahora indicios de que los cambios epigenéticos causados por el consumo de drogas o el estrés crónico pueden modificar la forma en que el cerebro responde a la experiencia. Esos cambios hacen que un individuo reaccione con resiliencia o sucumba a la adicción, la depresión u otros trastornos psiquiátricos. Aunque todavía estamos empezando a comprender esa interacción entre genes y ambiente, esperamos que los resultados nos permitan mejorar los tratamientos de estas dolencias devastadoras. Incluso tal vez nos ofrezcan una nueva perspectiva sobre los mecanismos de herencia de las enfermedades mentales.

MÁS ALLÁ DE LOS GENES

Nuestros esfuerzos por desentrañar el modo en que los factores epigenéticos influyen en las enfermedades mentales están contribuyendo a resolver enigmas, planteados desde hace decenios, sobre el origen genético de la adicción, la depresión, el autismo, la esquizofrenia y otros trastornos psiquiátricos. Como la mayoría de las enfermedades, las dolencias neurológicas pueden heredarse: alrededor de la mitad del riesgo de adicción o depresión es genético, proporción superior al riesgo de padecer hipertensión arterial o numerosos tipos de cáncer. Pero los genes no lo son todo. Tal como vimos en el caso de Greg y Matt, incluso poseer genes idénticos no garantiza que dos individuos contraigan la misma enfermedad. Por el contrario, lo que desencadena trastornos psiquiátricos en personas con una predisposición genética concreta son los estímulos ambientales, como la exposición a drogas o al estrés, e incluso ciertos eventos moleculares que se producen al azar durante el desarrollo. No existen dos personas que presenten las mismas experiencias o trayectoria de desarrollo.

Por tanto, deberíamos formularnos la siguiente pregunta: ¿Qué mecanismos determinan que esos estímulos desencadenen una enfermedad mental? La respuesta resulta obvia a cierto nivel: la herencia y el ambiente convergen para dar forma a las células del cerebro. Las neuronas procesan todo lo que experimentamos (ya sea ver una película, recibir un abrazo, esnifar cocaína o preguntarnos qué hay para cenar) y comparten información unas con otras al liberar y reconocer ciertas sustancias, los neurotransmisores. Estos estimulan o inhiben distintas neuronas, a la vez que activan o desactivan una serie de genes. Conocer los genes que se ven influidos por un determinado neurotransmisor nos ayudará a establecer el modo en que una neurona responderá ante una experiencia y, en última instancia, moldeará la conducta de un individuo.

Muchos de esos efectos son de duración breve. Por ejemplo, la exposición a la cocaína activa el centro cerebral de la recompensa, lo que produce un estado de euforia transitoria. Este sentimiento se desvanece pronto y el sistema se restablece. La forma en que las drogas, el estrés u otras experiencias engendran efectos a largo plazo y hacen que un individuo sucumba a la depresión o a la adicción representa todavía un enigma.

EN SÍNTESIS

Nuevos hallazgos indican que las experiencias contribuyen a la enfermedad mental mediante la adición o eliminación de señales epigenéticas en los cromosomas.

Los estudios con ratones demuestran el papel de las modificaciones epigenéticas de larga duración en los trastornos como la adicción y la depresión.

Los cambios epigenéticos pueden afectar también la conducta materna: las crías reproducen el comportamiento de la madre, aunque los cambios no se transmiten por línea germinal.

Aunque queda mucho camino por recorrer, se espera que los nuevos descubrimientos ayuden a mejorar el tratamiento de las enfermedades mentales.

Muchos neurocientíficos piensan que justo en este punto interviene la epigenética.

MARCAS EN LOS GENES

Para entender mejor la influencia de la epigenética, resulta útil conocer algunos aspectos sobre la regulación de la actividad génica. Un gen, en términos simplificados, corresponde a un fragmento de ADN que especifica la configuración de una proteína. Las proteínas ejecutan la mayoría de los procesos celulares y, por tanto, controlan el comportamiento de la célula. El ADN no se distribuye al azar dentro del núcleo celular, sino que, como un hilo alrededor de un huso, se enrolla alrededor de grupos de proteínas, las histonas, y se empaqueta después para formar los cromosomas. La combinación de proteína y ADN en los cromosomas se conoce como cromatina.

Aparte de mantener ordenado el núcleo, el empaquetamiento del ADN cumple otras funciones. Una de ellas consiste en ayudar a regular la conducta de los genes que contiene. Una configuración apretada tiende a mantener los genes en estado inactivo, ya que impide el acceso de la maquinaria que los pone en marcha. En una neurona, por ejemplo, los genes que codifican las enzimas hepáticas se hallan ocultas en regiones cromosómicas densamente empaquetadas. No obstante, cuando se requiere un gen, la región de ADN en la que este reside se despliega ligeramente, con lo que el gen se vuelve accesible a la maquinaria celular que transcribe el ADN en una cadena de ARN. En muchos casos, este ARN servirá de plantilla para producir la proteína codificada. La estimulación de una neurona induce así a la célula a transcribir genes que codifican ciertos neurotransmisores y, en consecuencia, aumenta la síntesis de esas moléculas mensajeras.

Las señales epigenéticas determinan que un segmento de cromatina se halle distendido (preparado para la activación) o condensado (apagado de forma temporal o permanente). Se trata de marcadores químicos que se unen a las histonas o al mismo ADN. Las señales adoptan distintas formas y juntas crean una especie de código que indica cuán densamente empaquetada debe estar la cromatina y si los genes subyacentes deben transcribirse o no.

Las modificaciones epigenéticas son realizadas por diversas enzimas, algunas de las cuales añaden marcadores y otras los eliminan. C. David Allis, de la Universidad de Rockefeller, las ha denominado «escritoras» y «borradoras» del código genético. La enzima histona acetiltransferasa, que incorpora un grupo acetilo a una histona, es escritora; la histona desacetilasa, que elimina esta señal, borradora. Las señales atraen entonces a otras proteínas que actúan como «lectoras». Las lectoras se unen a determinados marcadores epigenéticos y aflojan o condensan la cromatina que las rodea mediante la movilización de otras proteínas reguladoras que estimulan o inhiben la transcripción de los genes subyacentes. Así, las histonas que se hallan muy acetiladas atraen a lectoras que tienden a abrir la cromatina y a otras proteínas que promueven la activación génica. Por el contrario, las histonas con numerosos grupos metilo atraen a lectoras que inhiben o promueven la transcripción, según la localización exacta de las señales metilo.

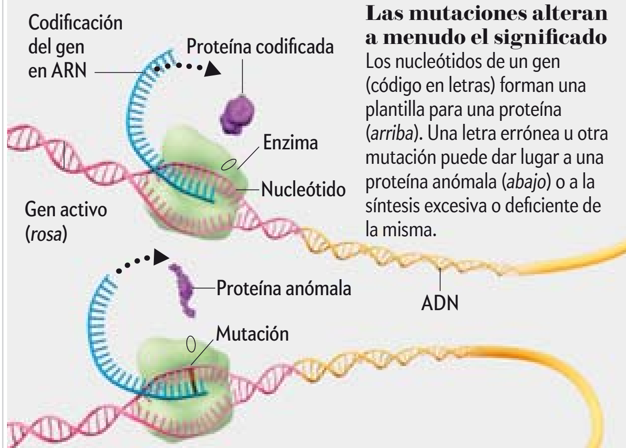
El ambiente puede influir en la actividad génica mediante la regulación de la conducta de las escritoras y borradoras epigenéticas, que a su vez determina la marcación y reestructuración de la cromatina. A veces los marcadores persisten poco tiempo, lo que permite a una neurona responder con rapidez a

ILUSTRACIONES DE AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

CONCEPTOS BÁSICOS

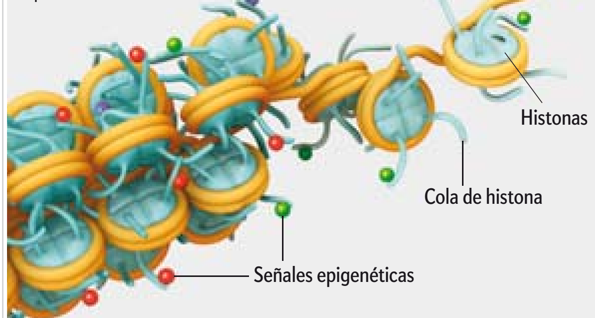
Genética frente a epigenética

Muchos de los nuevos conocimientos sobre las enfermedades mentales han surgido del estudio de modificaciones epigenéticas de los genes, que son distintas de las mutaciones genéticas. Ambos tipos de alteraciones pueden afectar el funcionamiento del cerebro y otros tejidos.

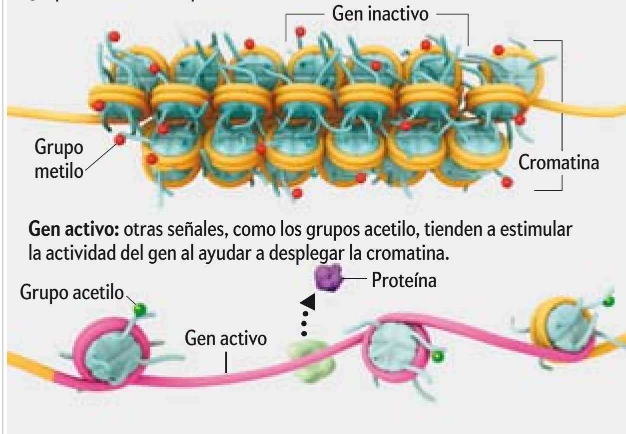


Las mutaciones alteran a menudo el significado
Los nucleótidos de un gen (código en letras) forman una plantilla para una proteína (*arriba*). Una letra errónea u otra mutación puede dar lugar a una proteína anómala (*abajo*) o a la síntesis excesiva o deficiente de la misma.

Los cambios epigenéticos alteran la actividad
Los marcadores químicos conocidos como señales epigenéticas se sitúan sobre los genes, ya sea en el mismo ADN o en las histonas (las proteínas sobre las que se enrolla el ADN) (*abajo*). Los cambios en la mezcla de estas señales pueden alterar el comportamiento de un gen: lo desactivan, de forma que se inhibe la síntesis de proteína, o bien lo activan, todo ello sin hacer variar la información que contiene.



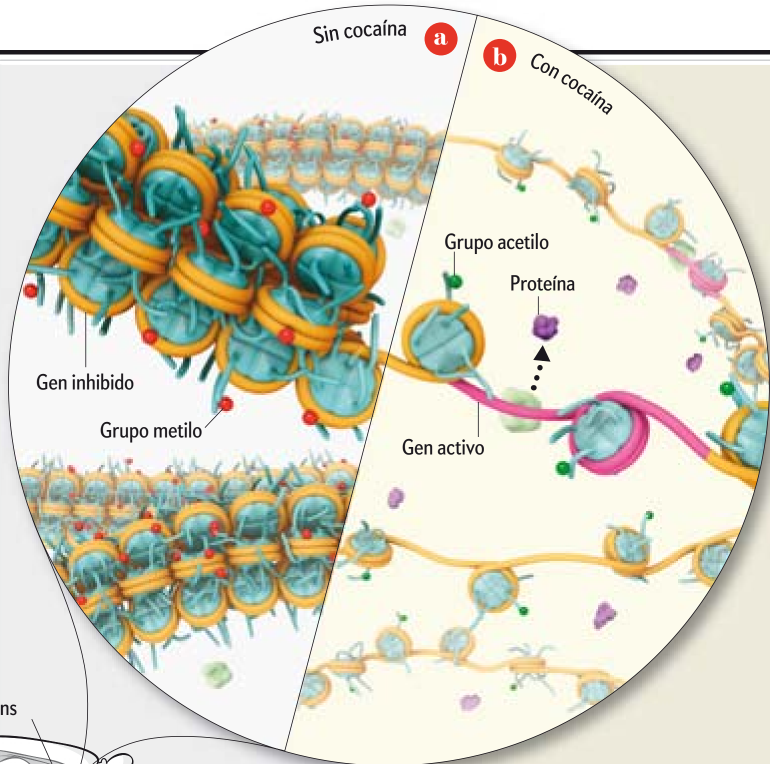
Gen inactivo: algunas señales epigenéticas provocan una condensación de la cromatina (complejo compuesto por ADN con histonas y otras proteínas) y, por consiguiente, impiden la codificación de los genes. Algunas veces los grupos metilo desempeñan tal función.



Gen activo: otras señales, como los grupos acetilo, tienden a estimular la actividad del gen al ayudar a desplegar la cromatina.

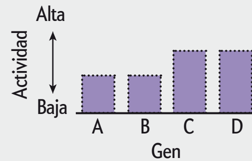
Epigenética de la adicción

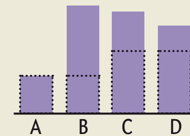
Algunos estudios con ratones han demostrado que la exposición crónica a la cocaína provoca un desequilibrio en las señales epigenéticas de los genes del centro cerebral de la recompensa. Ese cambio vuelve a los animales más sensibles a los efectos de la droga y más propensos a convertirse en adictos.

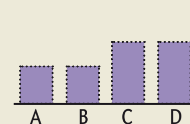


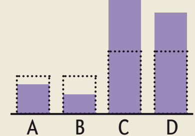
¿Qué cambia exactamente?

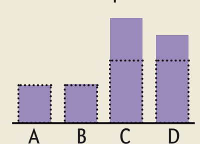
Incluso una única dosis de cocaína puede alterar el perfil epigenético de los genes en el núcleo accumbens, una zona del centro de la recompensa. En ausencia de droga (a) predominan las señales metilo, lo que hace condensar la cromatina y silenciar sus genes. La cocaína provoca un predominio de los grupos acetilo, que aflojan la cromatina (b). Entonces se activan numerosos genes que codifican proteínas implicadas en la respuesta placentera a la droga.











Efectos duraderos

La exposición inicial a la cocaína eleva de forma transitoria la actividad de muchos genes (representado esquemáticamente por cambios en *B, C* y *D, arriba a la izquierda*), pero pronto la actividad regresa a la línea base. No obstante, la exposición crónica produce efectos más complejos: algunos genes se vuelven menos sensibles a la droga (*A* y *B, arriba a la derecha*), pero esta estimula la actividad de otros a un nivel incluso superior al anterior (*C* y *D, abajo a la derecha*). Algunos de los genes se mantienen hiperactivos durante un período de tiempo anormalmente largo.

la estimulación intensa al producir una onda sostenida de liberación de neurotransmisor. Pero a menudo los marcadores permanecen activos durante meses o años, incluso a lo largo de toda la vida del organismo. En la memoria, refuerzan o debilitan las conexiones neurales implicadas en el establecimiento de los recuerdos.

La adición y eliminación de grupos metilo y acetilo (y otras señales) ayudan, pues, al cerebro a responder y adaptarse a retos ambientales y a la experiencia. Sin embargo, mi laboratorio y otros estamos comprobando, en estudios con animales, que estos procesos epigenéticos beneficiosos fallan en los trastornos de adicción o depresión. En tales situaciones, una configuración alterada de las señales activa ansias compulsivas, induce sentimientos de indefensión o predispone al animal a una conducta inadaptada. El examen del tejido cerebral humano en la autopsia sugiere que el mismo fenómeno podría darse en las personas.

UNA HUELLA ADICTIVA

Los hallazgos relacionados con la adicción contribuyen a aclarar el modo en que las drogas se hacen con el control del centro de la recompensa en el cerebro. Numerosos estudios han identificado un cambio drástico en la activación génica como consecuencia del consumo de cocaína, opiáceos u otras sustancias adictivas. Se observó que algunas de esas alteraciones se mantenían incluso después de meses de abstinencia, si bien ha resultado difícil explicar los mecanismos responsables de esa persistencia. Dados los efectos a largo plazo que pueden acarrear los cambios epigenéticos, hace unos diez años nos propusimos examinar si la cocaína podía alterar la actividad de los genes del centro cerebral de la recompensa al modificar sus marcadores epigenéticos. Igual que en los humanos, la cocaína causa una fuerte adicción en los animales, por lo que su efecto a largo plazo puede estudiarse con facilidad en el laboratorio.

Una sola dosis de cocaína provoca cambios notables y extensos en la expresión génica, según se observa en la concentración de ARN (parámetro que refleja la activación génica). Una hora después de que el ratón reciba una primera inyección de cocaína, se activan unos 100 genes nuevos. Y al exponer a los animales a la droga de forma crónica se observa un efecto aún más interesante. Muchos de los genes que se habían activado ante la exposición aguda a la cocaína, se silencian si la droga se administra todos los días. Esto es, se vuelven «insensibles» a la droga.

No obstante, un número aún mayor de genes presentan el efecto contrario: a pesar de activarse de forma transitoria en respuesta a la dosis inicial de cocaína, una exposición prolongada a la misma aumenta todavía más sus niveles de actividad, en algunos casos semanas después de que el animal haya recibido la última inyección. Es más, estos genes permanecen sumamente sensibles a la cocaína incluso tiempo después de que el animal haya dejado de recibir la droga. Así, el consumo crónico de cocaína prepara a estos genes para su futura activación, que aprenden a «recordar» el efecto de recompensa de la droga. Esta huella también hace al animal más vulnerable a la recaída, lo que allana el camino hacia la adicción. Al parecer, el aumento de la sensibilidad tiene su origen en modificaciones epigenéticas de los genes.

Mediante técnicas que permiten clasificar las señales epigenéticas en todo el genoma del ratón, hemos demostrado que la administración prolongada de cocaína modifica la configuración del grupo de marcadores acetilo y metilo de cientos de genes del centro cerebral de la recompensa. En conjunto, esos cambios tienden a aflojar la estructura de la cromatina, con lo que los genes se activan más fácilmente en una exposición posterior a la droga. De nuevo, los cambios duran solo unas pocas horas después de que el animal haya consumido la droga. No obstante, algunos persisten más tiempo. Hemos registrado que lo hacen al menos durante un mes, e incluso periodos más largos.

También estamos empezando a descubrir los mecanismos que dan lugar a los cambios duraderos. Observamos que la administración crónica de cocaína reduce la actividad de ciertas enzimas borradoras que eliminan grupos acetilo, así como de determinadas escritoras que añaden grupos metilo inhibidores. La cromatina más acetilada (o menos metilada) adquiere una configuración más abierta, relajada, con lo que sus genes se vuelven más accesibles para la activación. La exposición prolongada a la cocaína altera también la actividad de otras escritoras y borradoras en el centro cerebral de la recompensa, que dejan a su paso un abanico de marcadores epigenéticos que favorecen la activación génica. En apoyo a esta observación, hemos demostrado que cuando interferimos artificialmente en las actividades de estas escritoras y borradoras para imitar los efectos del consumo crónico de drogas, sin administrar en verdad la droga, los animales se vuelven más sensibles a los efectos placenteros de la cocaína, uno de los sellos distintivos de la adicción.

Las alteraciones en la actividad de las escritoras y borradoras después del consumo prolongado de cocaína también son duraderas, lo que explicaría los cambios a largo plazo en la actividad de los genes marcados, así como la respuesta del animal a las experiencias futuras. Debido a que el centro cerebral de la recompensa reacciona a tan amplio abanico de estímulos (incluidos la comida y el sexo), la manipulación de la actividad de las neuronas en este centro permitiría modificar el comportamiento del animal.

MARCAS PARA LA DEPRESIÓN

Las adaptaciones neurales que afectan al comportamiento a largo plazo dan lugar a una de las enfermedades psiquiátricas más crónicas e incapacitantes: la depresión. Al igual que la adicción, algunos aspectos de este trastorno pueden estudiarse con mayor facilidad en animales. En mi laboratorio hemos trabajado con ratones sometidos a indefensión social crónica. Se hace convivir machos dóciles con machos agresivos agrupados de dos en dos. Tras diez días de sufrir acosos, los ratones dóciles muestran muchos de los signos de la depresión humana: ya no disfrutan de las actividades placenteras (sexo, comer dulces) y se vuelven más ansiosos y retraídos, y menos atrevidos. Algunos incluso pueden llegar a comer en exceso hasta convertirse en obesos. Varios de estos cambios duran meses y pueden corregirse por medio de la administración crónica de los mismos antidepresivos que se usan para tratar la depresión humana.

Al estudiar el ADN de los ratones, observamos alteraciones en las señales epigenéticas de unos 2000 genes del centro de la recompensa del cerebro. En 1200 de estos genes, hallamos un aumento de un determinado marcador epigenético, una forma de metilación de histonas que inhibe la actividad génica. Parece que la depresión silenciaría genes importantes para el funcionamiento de la parte del cerebro que permite al animal sentirse bien, donde se crearía una especie de «cicatriz molecular». Descubrimos que muchas de esas anomalías inducidas por estrés podían repararse tratando al animal durante un mes con imipramina, un antidepresivo de uso común. En muestras de cerebros obtenidas de personas que sufrían depresión en el momento de fallecer se han identificado alteraciones epigenéticas parecidas.

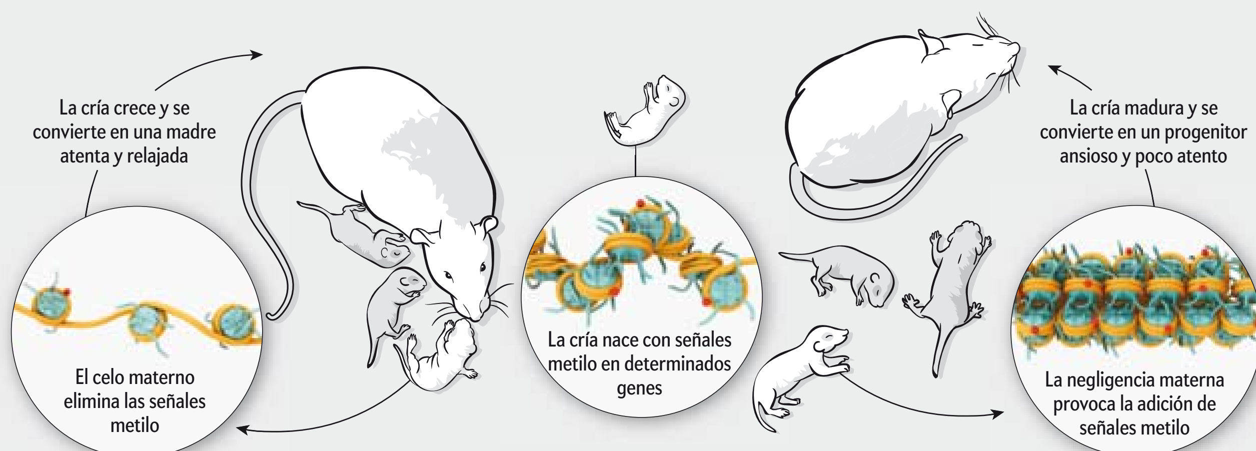
Aunque la depresión es un trastorno frecuente en la población humana, no todas las personas presentan la misma vulnerabilidad. Lo mismo sucede en los ratones. Un tercio aproximado de los machos sometidos a la prueba de indefensión social no enfermaron: a pesar de sufrir el mismo estrés incesante, no exhibieron ninguno de los signos de retraimiento y apatía que presentaron sus coetáneos. Esta resiliencia se refleja en los genes. Muchos de los cambios epigenéticos inducidos por el estrés que vemos en ratones vulnerables no ocurren en ratones resilientes. Estos últimos muestran en cambio variaciones epigenéticas, no observadas en los ratones que se deprimen, en una nueva serie de genes del centro de la recompensa. Los hallazgos sugieren que el distinto patrón de modificación confiere protección y que la resiliencia no solo corresponde a la ausencia de vulnerabilidad; implica un programa epigenético activo al que se puede recurrir para combatir los efectos del estrés crónico.

También descubrimos que los genes protectores modificados epigenéticamente en los ratones resilientes coincidían en gran medida con los genes de ratones deprimidos cuya actividad volvía a la normalidad después de tratar a los animales con imipramina. Se sabe que un subgrupo de esos genes estimulan la actividad del centro de la recompensa y, por consiguiente, previenen la depresión. Ello hace pensar en la posibilidad de que, en las personas, los antidepresivos funcionen en parte mediante la activación de algunos de los mismos programas epigenéticos protectores que intervienen en individuos menos vulnerables a la depresión. En caso de ser así, además de buscar fármacos que supriman los efectos negativos del estrés crónico, deberíamos también identificar medicamentos que estimulen los mecanismos cerebrales naturales de resiliencia.

NUEVA FORMA DE HERENCIA

Mi madre y yo

Algunos estudios realizados con ratas han revelado que la epigenética puede influir en la conducta materna. Dicho efecto, que actúa solo en el cerebro de la cría, sin alterar las células germinales, puede transmitirse de una generación a la siguiente. Cuando nacen las crías, los genes implicados en la regulación de la respuesta del animal al estrés poseen señales metilo con efecto inhibidor, las cuales aumentan la sensibilidad al estrés. Si las crías reciben los cuidados de una madre relajada y atenta, muchos de los grupos metilo desaparecerán, lo que dejará a los animales más calmados. Cuando estas crías maduren, se convertirán a su vez en madres tranquilas y atentas. No obstante, si las crías crecen con una madre pasiva y temerosa, sus genes se llenarán de señales metilo; cuando maduren, se convertirán también en cuidadoras nerviosas y negligentes.



LEGADO MATERNO

Los efectos que he expuesto hasta aquí solo persisten durante un mes, el período más largo de tiempo que hemos estudiado. Pero las modificaciones epigenéticas pueden fomentar cambios conductuales que duran toda la vida, tal como han demostrado Michael Meaney y su equipo de la Universidad McGill. Meaney ha investigado los efectos del cuidado materno en las modificaciones epigenéticas y en la conducta ulterior de las crías.

Los investigadores observaron que mientras que algunas hembras de rata prodigan los cuidados entre sus crías, a las que lamen y acicalan, otras son menos diligentes. Cuando se las molesta, las crías de las madres activas se muestran menos ansiosas y producen menos hormonas del estrés que las ratas criadas por madres pasivas. Lo que es más, las hembras criadas por madres cuidadoras se convierten a su vez en madres atentas.

El grupo de Meaney demostró a continuación que los efectos de la conducta maternal están mediados, al menos en parte, por mecanismos epigenéticos. Las ratas criadas por madres pasivas exhiben una mayor metilación del ADN en las secuencias reguladoras de un gen que codifica el receptor de los glucocorticoides, una proteína presente en la mayoría de las células que interviene en la respuesta del animal a una hormona del estrés, el cortisol. La metilación excesiva, detectada en el hipocampo (región del cerebro implicada en el aprendizaje y la memoria) induce a las neuronas a sintetizar menos receptores. Debido a que la activación del receptor de glucocorticoides en el hipocampo indica al organismo que ralentice la producción de cortisol, la reducción epigenética del número de receptores de cortisol exacerba la respuesta al estrés en los animales. Estos se vuelven más ansiosos y miedosos, características que mantendrán a lo largo de toda su vida. Pero podría haber otros efectos, además del que se ejerce sobre el receptor de glucocorticoides. Frances Champagne y su equipo, de la Universidad de Columbia, han descubierto diferencias epigenéticas similares en el gen que codifica el receptor estrogénico en ratas criadas por madres activas y pasivas. Puede, entonces, que la señalización epigenética de otros genes intervenga en la programación de respuestas en algo tan complejo como la conducta maternal y, por consiguiente, determinen su herencia.

En esa situación, parece que los cambios epigenéticos producidos en un gen de una generación pueden transmitirse a la siguiente, a pesar de que las modificaciones no se pasan a través de la línea germinal. La conducta de una madre define la regulación epigenética de los genes en el cerebro de una cría, la cual adopta entonces el mismo comportamiento. Este, a su vez, determina las señales epigenéticas y la conducta de sus propias crías, y así sucesivamente.

CURACIÓN EPIGENÉTICA

Un avance clave en los próximos decenios consistirá en sacar provecho de lo que estamos aprendiendo acerca de las modificaciones epigenéticas y la conducta para mejorar el tratamiento de diversos trastornos mentales. Nuestro laboratorio y otros hemos comprobado que los fármacos que mantienen las histonas cubiertas de grupos acetilo (mediante la inhibición de las enzimas que borran estas señales) tienen potentes efectos antidepresivos. Además, a pesar de que la actitud materna pasiva se asocia a cambios en la metilación del ADN, Meaney ha revelado que los mismos fármacos fomentan la conducta protectora, porque la acetilación aumentada puede contrarrestar los efectos de la excesiva metilación.

Aunque esos resultados son prometedores, seguramente los inhibidores hoy disponibles en el mercado no sirvan para tra-

tar la enfermedad mental. Las enzimas borradoras de acetilo (histona desacetilasa) regulan la señalización epigenética en células de todo el cerebro y el cuerpo, de forma que los fármacos que las inutilizan sin distinción tienen efectos secundarios graves y pueden resultar tóxicos. Una solución consistiría en desarrollar medicamentos que inhibieran de modo selectivo las formas de histona desacetilasa que abundan en las áreas del cerebro más afectadas por determinados trastornos, como el centro de la recompensa. Describir otras proteínas que intervienen en las modificaciones epigenéticas del cerebro también representaría un avance. Aunque sin duda la estrategia más fructífera sería determinar los genes sujetos a una modificación epigenética en la depresión o en la adicción: los genes de receptores de determinados neurotransmisores o proteínas de señalización implicados en la activación neural. Entonces podríamos centrar nuestros esfuerzos en diseñar fármacos que modificaran la actividad de esos genes (o la proteína codificada por ellos).

HERENCIA EPIGENÉTICA

Una pregunta intrigante sigue sin respuesta: ¿Hasta qué punto se transmiten a la descendencia los cambios epigenéticos que acompañan a los trastornos mentales? En los experimentos de Meaney, las ratas «heredan» de sus madres ciertos patrones de conducta, así como los perfiles epigenéticos asociados a ellos. Pero esos cambios, influidos por la conducta, se producen en el cerebro. No afectan a las células germinales que formarán un nuevo embrión. De ahí que se plantee una pregunta aún más excitante: ¿pueden las experiencias causar cambios epigenéticos en los espermatozoides y óvulos, que a continuación pasarían a la progenie de un individuo?

No es inverosímil pensar que el estrés crónico o una droga pueda alterar la actividad de algunos genes de las células reproductoras; después de todo, las hormonas del estrés y las drogas no solo se restringen al cerebro, sino que inundan el cuerpo entero, incluidos los testículos y los ovarios. Sin embargo, resulta difícil entender cómo un cambio en los gametos podría persistir durante generaciones. Las modificaciones epigenéticas adquiridas se borran durante las divisiones celulares que dan lugar a espermatozoides y óvulos. Además ¿cómo podrían esas alteraciones, en caso de presentarse en un embrión, acabar influyendo sobre la actividad génica en determinadas partes del cerebro o en los órganos endocrinos de un adulto?

A pesar de todo, algunos trabajos indican que ciertos cambios epigenéticos podrían heredarse. Varios grupos han observado que los roedores con estrés crónico dan a luz a crías muy vulnerables al estrés. El equipo de Isabel Mansuy, de la Universidad de Zúrich, separó a crías de ratón de su madre durante las primeras dos semanas de vida y descubrió que, en la edad adulta, los hijos machos mostraban signos de depresión. Cuando a continuación estos machos se apareaban con hembras normales, su descendencia exhibía también conductas de depresión en la edad adulta, a pesar de no haberla sometido a estrés durante los primeros años de vida. La transmisión de la vulnerabilidad al estrés guardaba relación con una metilación alterada del ADN en determinados genes de los espermatozoides y de las neuronas.

Nuestro grupo realizó un estudio semejante. Mediante el modelo de indefensión social con el que trabajamos, sometimos a ratones macho a estrés crónico. Tras aguardar un mes para que los machos se reprodujeran, descubrimos que sus crías eran mucho más propensas a la depresión. Entonces llevamos el experimento un paso más allá. Si las modificaciones epigenéticas que hacen a los ratones sensibles a la depresión se heredaran, esos cambios deberían alcanzar también a los gametos de los animales. Empleamos espermatozoides de ratones macho acosados para fecundar artificialmente óvulos de hembras normales. Descubrimos que la descendencia de esa unión era casi completamente normal: mostraba solo leves indicios del comportamiento retraído y la ansiedad manifestados por sus progenitores masculinos.

Ese experimento no es concluyente, ya que los espermatozoides podrían despojarse de los marcadores epigenéticos durante el proceso de fecundación in vitro. No obstante, los resultados sugieren que las hembras que se habían apareado de forma natural con machos intimidados trataron a sus crías de modo distinto que las hembras apareadas con machos normales o que nunca conocieron a los padres de sus crías. En consecuencia, la depresión de la progenie podría tener su origen en una experiencia conductual temprana y no deberse a una herencia epigenética directa transmitida a través de los espermatozoides u óvulos.

Ello no significa que la transmisión de una generación a otra resulte imposible, aunque en la actualidad no disponemos de ningún dato que lo demuestre. Para abordar esta cuestión, deberemos desarrollar herramientas experimentales que nos permitan identificar las modificaciones epigenéticas de interés en las células germinales. A continuación, deberemos confirmar si esos cambios son necesarios y suficientes para inducir la transmisión de los rasgos observados.

El biólogo del siglo XVIII Jean-Baptiste Lamarck fue conocido por su teoría de la herencia de rasgos adquiridos. De acuerdo con esa idea, las características que los organismos adquieren a lo largo de su vida, por ejemplo una musculatura desarrollada, pueden transferirse a la descendencia. Por supuesto, ahora sabemos que los genes de un individuo desempeñan un papel dominante en la determinación de la fisiología y la función. Al mismo tiempo, cada vez se reconoce más que la exposición al ambiente y a diferentes experiencias a lo largo del desarrollo y en la edad adulta pueden modificar la actividad de nuestros genes y, de ahí, la forma en que los rasgos se manifiestan. Ahora sabemos que los mecanismos epigenéticos forman parte de la interacción entre la herencia y el ambiente. Todavía queda un largo camino por recorrer antes de entender cómo y en qué medida influye la epigenética sobre nuestra conducta y vulnerabilidad a las enfermedades mentales, y si dicha vulnerabilidad puede transmitirse a futuras generaciones. No hay duda de que Lamarck y sus críticos hubiesen estado encantados de participar en este debate.

PARA SABER MÁS

Epigenetic regulation in psychiatric disorders. N. Tsankova, W. Renthal, A. Kumar y Eric J. Nestler en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, págs. 355-367, mayo de 2007.

Epigenetic programming of phenotypic variations in reproductive strategies in the rat through maternal care. N. M. Cameron *et al.* en *Journal of Neuroendocrinology*, vol. 20, n.º 6, págs. 795-801, junio de 2008.

Why DNA isn't your destiny. John Cloud en *Time*, vol. 175, n.º 2, 18 de enero de 2010. **www.time.com/time/magazine/article/0,9171,1952313,00.html**

Epigenetic regulation of genes in learning and memory. T. L. Roth, E. D. Roth y J. D. Sweatt en *Essays in Biochemistry*, vol. 48, n.º 1, págs. 263-274, septiembre de 2010.

Epigenetic transmission of the impact of early stress across generations. T. B. Franklin *et al.* en *Biological Psychiatry*, vol. 68, n.º 5, págs. 408-415, septiembre de 2010.

The epigenetic landscape of addiction. I. Maze y Eric J. Nestler en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1216, págs. 99-113, enero de 2011.

Información sobre epigenética en el sitio web de la Universidad de Utah: **learn.genetics.utah.edu/content/epigenetics**



COMPORTAMIENTO ANIMAL

Las hormigas y el arte de la guerra

Las batallas entre estos insectos guardan una sorprendente semejanza con las operaciones militares de los humanos

Mark W. Moffett



Mark W. Moffett es investigador del Museo Smithsoniano de Historia Natural, donde estudia la conducta de las hormigas. Ha viajado por todas las regiones tropicales de América, Asia y África para describir las sociedades de hormigas y descubrir especies nuevas.



Los furiosos combatientes forman una maraña por todas partes. La escala de la violencia resulta casi incomprensible, la batalla se extiende más allá de mi campo visual. Decenas de miles de individuos avanzan con rapidez y determinación suicida. Entregados por completo a su deber, los luchadores jamás abandonan una confrontación, ni siquiera ante una muerte segura. Los enfrentamientos son breves y brutales. De repente, tres soldados de infantería agarran un enemigo y lo sujetan hasta que uno de los guerreros más grandes llega y parte el cuerpo del prisionero, que acaba destrozado y sangrando.

Me retiro con mi cámara, jadeando en el aire húmedo de la selva malaya, y me recuerdo a mí mismo que estos rivales son hormigas, no humanos. He pasado meses observando estas muertes con una cámara fotográfica que uso a modo de lupa, pero a menudo me olvido de que lo que estoy contemplando son insectos minúsculos (en este caso se trata de *Pheidologeton diversus*, la hormiga merodeadora).

Desde hace tiempo se sabe que algunas especies de hormigas (y de termitas) forman colonias muy cohesionadas cuyos miembros se cuentan por millones y exhiben costumbres complejas. Entre sus hábitos destacan la regulación del tráfico, el mantenimiento de la salud de la comunidad, la domesticación de cultivos y, lo que quizá resulte más fascinante, la guerra: un feroz enfrentamiento entre dos grupos en el que ambos se arriesgan a la destrucción total. En este y otros sentidos, los humanos modernos nos parecemos más a las hormigas que a nuestros parientes vivos más cercanos, los simios, que viven en sociedades mucho más pequeñas. Sin embargo, hasta hace poco no se había apreciado la semejanza entre las tácticas de guerra de las hormigas y las nuestras. En ambas especies, la guerra conlleva una asombrosa variedad de elecciones sobre métodos de ataque y decisiones estratégicas sobre cuándo o dónde empezarlo.

Hormigas merodeadoras de una colonia atacan a un miembro de una colonia rival, al que van desmembrando lentamente.

JOHN DAWSON; ASESOR: STEFAN COVER, MUSEO DE ZOOLOGÍA COMPARATIVA, UNIVERSIDAD DE HARVARD

DESCONCIERTO Y PÁNICO

Esa semejanza en las artes bélicas resulta sorprendente, si se tienen en cuenta las acusadas diferencias entre hormigas y humanos, no solo en lo que respecta a la biología sino también a la estructura social. Las colonias de hormigas están formadas sobre todo por hembras estériles, que hacen de obreras o soldados; unos pocos machos de vida corta, que hacen de zánganos, y una o más reinas fértiles. Los miembros de la colonia operan sin necesidad de una jerarquía de poder o de un líder permanente. Aunque las reinas son el centro de la vida de la colonia, ya que se encargan de la reproducción, no lideran las tropas ni organizan el trabajo. Las colonias se hallan más bien descentralizadas, con obreras que apenas saben tomar decisiones de combate por sí solas. Decisiones que, por otro lado, resultan efectivas cuando las hacen en grupo, sin que medie ningún tipo de supervisión. Este proceso se denomina inteligencia colectiva. A pesar de la divergencia entre los estilos de vida de hormigas y humanos, ambos luchan contra sus enemigos por muchas de las mismas razones económicas, como el acceso a lugares habitables, el territorio, el alimento o incluso la mano de obra, ya que algunas especies de hormigas secuestran a sus rivales para usarlas como esclavas.

Las tácticas de guerra de las hormigas dependen de lo que se halle en juego. Algunas ganan la batalla mediante una ofensiva constante, lo que nos recuerda la afirmación que hizo el general Sun Tzu en su libro *El arte de la guerra*, del siglo VI a.C.: «La rapidez es la esencia de la guerra». De tal modo actúan las hormigas legionarias, cuyas especies viven en regiones cálidas de todo el mundo, y también otras especies, como la hormiga merodeadora asiática. Cientos, o incluso millones, de sus individuos avanzan ciegamente en una falange compacta, atacando a presas y enemigos a medida que se cruzan con ellos. En Ghana fui testigo del avance de una alfombra hirviente de obreras de la hormiga legionaria *Dorylus nigricans* a través de una zona de unos

30 metros de ancho. Estas hormigas legionarias africanas (las especies que se desplazan en grandes multitudes como *D. nigricans* se denominan hormigas viajeras o *siafu*) cortan la carne con sus mandíbulas en forma de cuchilla y pueden matar con rapidez a víctimas que superan miles de veces su tamaño corporal. A pesar de que los vertebrados suelen correr más que las hormigas, en Gabón vi una vez cómo una colonia de *siafu* devoraba vivo un antílope que había quedado preso en una trampa. Las hormigas legionarias y las merodeadoras echan a las hormigas rivales de los lugares donde hay alimento (el apabullante número de tropas basta para derrotar a cualquier rival y tomar el control de su pitanza). Pero las hormigas legionarias casi siempre cazan en masa con un objetivo más malicioso: asaltan a las otras sociedades de hormigas para arrebatarles las larvas y pupas, que se convertirán en su comida.

El avance de las falanges de hormigas legionarias y merodeadoras recuerda las formaciones de combate que los humanos han venido utilizando desde de los antiguos sumerios hasta los regimientos de la Guerra de Secesión. El hecho de marchar todas juntas sin un objetivo específico, como los humanos hacían a veces, convierte cada incursión en una apuesta arriesgada, ya que puede que las hormigas recorran un terreno yermo y no encuentren nada. Otras especies de hormigas envían fuera del nido a un número mucho menor de obreras, denominadas exploradoras, para que busquen el alimento por separado. Al abrirse en abanico a través de una superficie más extensa, descubren más presas y enemigos, mientras que el resto de la colonia permanece en casa.

Aun así, las colonias que dependen de exploradoras podrían acabar matando a un número menor de oponentes, porque una exploradora debe volver al nido y reunir una fuerza de combate. Allí deposita una feromona, una sustancia que hace que las tropas de reserva la sigan. En el tiempo que tarda una exploradora en reunir a las tropas para la batalla, el enemigo puede haberse reagrupado o retirado. En cambio, las obreras de las hormigas legionarias o merodeadoras disponen de inmediato de la ayuda que necesitan, porque un gran número de compañeras camina justo detrás de ellas. El resultado es un desconcierto y pánico superlativos.


1

DISTRIBUCIÓN DE LA TROPA

No es solo el enorme número de combatientes lo que hace a las hormigas legionarias y merodeadoras tan mortíferas. Mis investigaciones con las hormigas merodeadoras muestran que las tropas se despliegan de distintas maneras para aumentar la eficiencia y reducir el coste que ello supone a la colonia. La misión que se asigna a una hormiga hembra depende de su tamaño. Las obreras de las merodeadoras poseen una variedad de tamaños mayor que casi cualquier otra especie de hormiga. Las minúsculas «obreras menores» (los soldados de infantería descritos al principio) se desplazan con rapidez hacia el frente, la zona de peligro donde se establece el primer contacto con las colonias enemigas o las presas. Una sola obrera menor no tiene más posibilidades frente al enemigo que una exploradora igual de pequeña de otra especie que caza en solitario, pero un enorme número de ellas en el frente de una incursión constituye una barricada imponente. Aunque algunas morirán en el camino, las obreras menores retrasan el avance del enemigo o lo inutilizan hasta que las obreras medianas y mayores acuden para asestar el golpe mortal. Las últimas son mucho menos abundantes que las primeras, pero mucho más letales; algunos de sus individuos pesan hasta 500 veces más que una obrera menor.

Los sacrificios de las obreras menores en primera línea de combate aseguran una baja mortalidad de las medianas y mayores, cuya cría y sustento consume gran parte de los recursos de la colonia. Arriesgar la vida de los combatientes fácilmente reemplazables constituye una técnica de batalla consagrada por el tiempo. Las sociedades antiguas que vivían en los valles fluviales hicieron lo mismo con los granjeros a los que reclutaban. Al conllevar estos un bajo coste y hallarse disponibles en grandes cantidades, se llevaban lo peor de la guerra. Mientras tanto, los soldados de élite, que recibían el mejor entrenamiento y las mejores armas y armaduras, se mantenían más o menos a salvo entre esas hordas. Y así como los ejércitos humanos logran vencer al enemigo por desgaste, destruyendo sus unidades una por una en vez de atacarle de una vez (una táctica conocida por los estrategas militares como «victorias puntuales», las hormigas merodeadoras también acribillan a pequeños grupos de enemigos a medida que la incursión avanza, en lugar de enfrentarse a toda la fuerza oponente a la vez.

Además de matar otras especies de hormigas y presas, las hormigas merodeadoras se defienden de otras colonias de su misma especie para proteger el alimento y el territorio alrededor de sus nidos. Las obreras medianas y mayores se quedan en un segundo término mientras distintas obreras menores agarran por separado una pata del contrincante. Esas confron-

EN SÍNTESIS

Algunos tipos de hormigas viven en colonias muy cohesionadas que albergan miles o millones de individuos. Estos se pelean con los de otras colonias por la obtención de recursos como el territorio o el alimento.

Las variadas tácticas de combate utilizadas por estos insectos muestran un asombroso parecido con las estrategias bélicas de los humanos, que varían según lo que se halle en juego.

La capacidad de las hormigas para la guerra se ve potenciada por su inquebrantable lealtad a la colonia.





En el campo de batalla: Hormigas tejedoras, muy territoriales, tiran del cuerpo de una hormiga legionaria que, a pesar de ser mucho más fuerte que ellas, acabará hecha pedazos (*1*). Una pequeña hormiga melífera se mantiene en pie sobre una piedrecita para parecer más grande, un engaño táctico que ahuyenta a su enemiga, de mayor talla (*2*). Una obrera menor de hormiga merodeadora sobre la cabeza de una obrera mayor de la misma especie; las menores capturan a los enemigos, mientras que las mayores los matan (*3*). Una hormiga explosiva suicida revienta su rojizo cuerpo para rociar a su enemiga con una pega tóxica amarilla que matará a ambas al instante (*4*).





MARK W. MOFFETT, MINDEN PICTURES

taciones duran horas y resultan más mortíferas que las escaramuzas que acontecen entre las hormigas merodeadoras y otros rivales. Centenares de hormigas quedan entrelazadas en un espacio de pocos metros cuadrados mientras unas van haciendo pedazos a otras.

Esa variante entomológica del combate cuerpo a cuerpo representa la forma más habitual de destrucción entre hormigas. El número de muertes que se producen es elevado, lo que refleja el bajo coste de la mano de obra en una colonia grande. Las hormigas que desdeñan menos la pérdida de tropas utilizan armas de largo alcance para herir o suprimir al enemigo desde lejos. Así proceden las hormigas rojas *Formica* de Europa y Norteamérica, que aturden al enemigo con aerosol lacrimógeno, o las *Dorymyrmex bicolor* de Arizona, que arrojan piedras sobre la cabeza de los enemigos.

Las investigaciones llevadas a cabo por el grupo de Nigel Franks, actualmente en la Universidad de Bristol, han demostrado que la violencia organizada de las hormigas legionarias y merodeadoras concuerda con la ley del cuadrado de Lanchester, una de las ecuaciones que el ingeniero Frederick Lanchester desarrolló en la Primera Guerra Mundial para comprender las posibles estrategias y tácticas de las fuerzas opositoras. Sus cálculos revelaron que, cuando en un lugar se libran múltiples batallas a la vez, resulta más ventajosa la presencia de un gran número de efectivos que la capacidad individual de lucha. Solo cuando el peligro se vuelve extremo se pone en riesgo a las hormigas merodeadoras más grandes (como cuando alguien desentierra un nido, ante lo cual las obreras de distintos tamaños cargan contra el intruso y las mayores le infligen las mordeduras más feroces).

Pero igual que la ley del cuadrado de Lanchester no se cumple en todas las situaciones de enfrentamientos entre humanos, tampoco describe todos los comportamientos de las hormigas en guerra. Las hormigas amazonas o esclavistas ofrecen un ejemplo fascinante de ello. Algunos individuos de esta especie roban las larvas de otra colonia para criarlas como esclavas en la suya. La resistente armadura, o exoesqueleto, y las mandíbulas como puñales confieren una inigualable capacidad para el combate a estas hormigas. Sin embargo, son ampliamente superadas en número por las colonias que asaltan. Para evitar ser masacradas, algunas hormigas liberan una sustancia que provoca el caos en la colonia atacada e impide que las obreras enemigas se enfrenten a ellas. Según demostraron Franks y su entonces doctorando Lucas Partridge, de la Universidad de Bath, cuando las hormigas amazonas actúan así, están siguiendo otra estrategia de Lanchester, también observada en los humanos. Esta ley lineal, como se la denomina, propugna que cuando las batallas se desarrollan mediante enfrentamientos individuales (aquí favorecidos por la sustancia que provoca el caos), los mejores combatientes tienen asegurada la victoria incluso cuando el núme-

ro de enemigos es mayor. De hecho, una colonia asediada por hormigas amazonas a menudo permite que las invasoras lleven a cabo el saqueo sin defenderse en absoluto.

En las colonias de hormigas, el valor de un combatiente guarda relación con el riesgo que el mismo asume: cuanto más prescindible sea, con mayor probabilidad acabará siendo carne de cañón. Los guardias que flanquean los senderos de las hormigas merodeadoras, por ejemplo, suelen ser obreras viejas o mutiladas que apenas se tienen en pie mientras arremeten contra los intrusos. Tal y como Deby Cassill, de la Universidad de Florida del Sur, publicó en *Naturwissenschaften* en 2008, solo las hormigas de fuego más viejas (de unos meses de edad) se involucran en los combates, mientras que las obreras de varias semanas huyen, y los individuos de días se hacen los muertos y yacen inmóviles durante el ataque. Desde el punto de vista de las hormigas, la costumbre humana de llamar a filas a los jóvenes sanos puede parecer un sinsentido. Pero los antropólogos han hallado pruebas de que, al menos en algunas culturas, los guerreros con éxito suelen tener más descendencia. La ventaja reproductora compensaría entonces el riesgo que los jóvenes en la flor de la vida corren durante el combate, una ventaja inalcanzable para las hormigas obreras, que no se reproducen.

Las obreras de las tejedoras también son más independientes que las de las legionarias. Las incursiones de las legionarias restan autonomía a las obreras. Dado que sus tropas permanecen muy cerca del grupo mientras este avanza, requieren pocas señales comunicativas y responden a los enemigos y presas de una manera reglamentada. Las hormigas tejedoras, en cambio, deambulan más libremente y exhiben una respuesta más versátil ante oportunidades y amenazas. Estas diferencias de estilo recuerdan los contrastes entre la rigidez de los ejércitos de Federico el Grande y la flexibilidad y movilidad de las tropas de Napoleón Bonaparte.

Al igual que las hormigas legionarias, las tejedoras se sirven de tácticas similares para atrapar presas y para destruir al enemigo. Mediante su glándula esternal, esparcen una feromona de reclutamiento de corto alcance para obtener refuerzos que realicen la matanza. Hay otros mensajes que las tejedoras solo emplean en situaciones de guerra. Cuando una obrera vuelve de una lucha contra otra colonia, sacude su cuerpo ante las hormigas con las que se topa para alertarlas sobre el combate en curso. Al mismo tiempo, deposita un rastro diferente al anterior a lo largo de su sendero, una feromona que libera por la glándula rectal y que sus compañeras de colonia siguen para







Entrada sellada: Una hormiga constructora de puertas del género *Stenamma* (*centro*) utiliza una piedrecita para impedir que una hormiga legionaria (*izquierda*) entre en su nido.

MARK W. MOFFETT *Minden Pictures*

llegar al campo de batalla. Además, para reclamar un espacio previamente desocupado, las obreras utilizan otra señal: defecan en ese lugar, al igual que los cánidos marcan su territorio orinando en él.

CONTROL TERRITORIAL

Observaciones llevadas a cabo en hormigas tejedoras revelan la existencia de otras estrategias militares parecidas a las de los humanos. Las hormigas tejedoras ocupan gran parte del dosel de los bosques tropicales de África, Asia y Australia. Sus colonias pueden abarcar varios árboles y albergar 500.000 individuos, lo que las hace comparables a las enormes poblaciones de algunas hormigas legionarias. Las hormigas tejedoras también se asemejan a las legionarias por su acusada agresividad, aunque cada especie presenta un modus operandi diferente. Mientras que las legionarias no defienden su territorio, ya que deambulan juntas en busca de otras especies de hormigas a las que atacar para conseguir alimento, las tejedoras se afianzan en una zona y distribuyen las obreras por toda su superficie para mantener a los rivales fuera de su territorio.

Controlan hábilmente los grandes espacios entre los árboles defendiendo unos pocos puntos críticos, como la base de los troncos. De modo estratégico, ubican en las copas «nidos barracón», hechos con hojas, desde donde distribuyen las tropas hacia los lugares donde más se necesitan.

CUESTIÓN DE TAMAÑO

Tanto en hormigas como en humanos, la propensión a involucrarse en una guerra guarda cierta relación con el tamaño de la sociedad. Las colonias pequeñas raramente libran batallas prolongadas, a menos que sea para defenderse. Al igual que los cazadores-recolectores humanos, que suelen ser nómadas y tienden a vivir al día, las sociedades de hormigas pequeñas, constituidas por apenas unas docenas de individuos, no construyen infraestructuras duraderas de senderos, almacenes de alimento o espacios habitables por los que valga la pena morir. En tiempos de gran conflicto entre grupos, estas hormigas, al igual que sus homólogos humanos, preferirán la huida a la lucha.

Las sociedades de tamaño modesto poseen más recursos para defender, pero aún no son lo bastante grandes como para poner en riesgo sus tropas. Las hormigas melíferas del suroes-

te de Estados Unidos, que viven en colonias de tamaño mediano, con unos pocos miles de individuos, ofrecen un ejemplo del modo en que estos insectos mitigan el peligro. Para obtener presas de los alrededores sin ser molestadas por los rivales, llevan a cabo un torneo preventivo cerca de un nido vecino que mantiene al enemigo ocupado, en vez de arriesgarse a batallas mortíferas. Durante el torneo, los rivales se tienen en alto sobre sus seis patas y van girando unos alrededor de otros. Este comportamiento «zancudo» se asemeja a las incruentas exhibiciones de fuerza tan comunes en los clanes humanos pequeños, según sugirieron en su día los biólogos Bert Hölldobler, de la Universidad estatal de Arizona, y Edward O. Wilson, de la Universidad de Harvard. Con suerte, la colonia con las hormigas zancudas más pequeñas (por lo general, las de la colonia más débil) se retirarán sin perder vidas, pero si se presenta la oportunidad, el bando ganador causará estragos a sus enemigos: devorarán la descendencia de los perdedores y raptarán a las obreras «repletas», hormigas llenas de alimento que regurgitan cuando sus compañeras de nido hambrientas se lo piden. Las hormigas vencedoras arrastrarán a las repletas hasta su nido y mantendrán como esclavas a estas despensas vivientes. Para evitar este destino, las obreras de reconocimiento inspeccionan el torneo para evaluar si su bando se ve superado en número y, si es necesario, promover una retirada.

Los conflictos más intensos suelen tener lugar en las especies de hormigas con colonias maduras, formadas por cientos de miles de individuos o más. A menudo se ha considerado ineficientes estas grandes sociedades de insectos, al producir menos reinas nuevas y machos per capita que las colonias más pequeñas. Pero en mi opinión, su elevada productividad les permite invertir no solo en reproducción, sino también en una cantidad de mano de obra que supera sus necesidades habituales de trabajo (de modo parecido a como nuestros cuerpos acumulan tejido adiposo, del que podemos disponer en tiempos de carestía). Varios investigadores han propuesto que las hormigas, individualmente, tienen menos trabajo a medida que las colonias crecen, lo que aumenta el número de hormigas inactivas en un momento dado. De este modo, la ampliación de la colonia favorecería la expansión de una reserva de tropas exclusiva, la cual podría aprovechar al máximo la ley del cuadrado de Lanchester en sus encuentros con el enemigo. De manera similar, la mayoría de los antropólogos piensa que la guerra entre humanos emergió solo después de que nuestras sociedades experimentaran una explosión demográfica propiciada por la invención de la agricultura.

SUPERORGANISMOS Y SUPERCOLONIAS

La capacidad para las formas extremas de guerra en las hormigas surge, en última instancia, de una unidad social análoga a la de las células de un organismo. Las células se reconocen unas a otras mediante señales químicas en su superficie; un sistema inmunitario sano ataca a cualquier célula con una señal diferente. En la mayoría de las colonias con buena salud, las hormigas también se identifican unas a otras mediante señales químicas en su superficie corporal, y atacan o evitan a los extraños que emanan un olor diferente. Las hormigas exhiben este olor cual bandera tatuada en sus cuerpos. La persistencia del olor significa que la guerra nunca terminará con una colonia apropiándose de otra. Las hormigas adultas no pueden realizar cambios de bando a mitad del conflicto: con escasas excepciones, cada obrera forma parte de su sociedad natal hasta que muere. (Aunque los intereses de la hormiga y la colonia no siempre coincidan. Las obreras de algunas especies pueden intentar reproducirse y ver frustrado su plan, al igual que dentro de un organismo puede haber conflictos de intereses entre genes.) Esta identificación con la colonia es todo cuanto poseen las hormigas, ya que forman sociedades anónimas: más allá de distinguir castas, como los soldados y las reinas, las obreras no se reconocen unas a otras como individuos. Su compromiso social absoluto es la característica fundamental de vivir como parte de un superorganismo, en el que la muerte de un trabajador no tiene más consecuencias que un corte en un dedo: cuanto mayor sea la colonia, menos se sentirá un pequeño corte.

El ejemplo más sobrecogedor de lealtad a la colonia lo ofrece la especie *Linepithema humile*. A pesar de ser originaria de Argentina, se ha expandido hacia otros lugares sirviéndose de los desplazamientos humanos: en California, la más grande de estas «supercolonias» va desde San Francisco hasta la frontera con México y podría contener un billón de individuos, unidos por la misma identidad «nacional». Cada mes, millones de hormigas argentinas mueren a lo largo de frentes de batalla que se extienden varios kilómetros en la proximidad de San Diego. Allí se desarrollan combates con otras tres colonias, los cuales quizás han venido sucediéndose desde que la especie llegó a ese estado hace un siglo. En las batallas, la ley del cuadrado de Lanchester se cumple con toda su crudeza. Las obreras de la hormiga argentina, baratas y minúsculas, van siendo reemplazadas por un inagotable suministro de refuerzos a medida que caen. Al superar en número a cualquier especie nativa que encuentran en su camino, estas supercolonias controlan territorios absolutos y matan a todos los rivales con los que entran en contacto.

¿A qué se debe la incesante capacidad de combate de las hormigas argentinas? Muchas especies de hormigas y otros animales, entre ellos los humanos, presentan el fenómeno del «querido enemigo». Después de un período de conflicto, las tasa de mortalidad decrece bruscamente a medida que se establece una frontera entre los dos bandos (con frecuencia, una tierra sin dueño desocupada). Sin embargo, en las llanuras de inundación donde se originaron las hormigas argentinas, las colonias en guerra abandonan la batalla cada vez que crece el nivel del agua, lo que las obliga a desplazarse a tierras más altas. El conflicto nunca se resuelve, la batalla nunca termina. Por tanto, década tras década, sus guerras prosiguen con toda la furia inicial.

Las expansiones violentas de las supercolonias de hormigas recuerdan el modo en el que las superpotencias coloniales humanas erradicaron en el pasado a grupos más pequeños, desde los nativos americanos hasta los aborígenes australianos. Por suerte, los humanos no formamos superorganismos en el sentido que he descrito: nuestras lealtades pueden cambiar con el tiempo para acoger a los inmigrantes y para permitir que las naciones se definan a sí mismas. Aunque para muchas hormigas la guerra resulte ineludible, nosotros sí podemos evitarla.

PARA SABER MÁS

The ants. Bert Hölldobler y Edward O. Wilson. Belknap Press, 1990.

Individual versus social complexity, with particular reference to ant colonies. C. Anderson y D. W. McShea en *Biological Reviews*, vol. 76, n.º 2, págs. 211-237; mayo de 2001.

Arms races and the evolution of big fierce societies. Graeme P. Boswell et al. en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 268, n.º 1477, págs. 1723-1730; 22 de agosto de 2001.

Adventures among ants. Mark W. Moffett. University of California Press, 2011.

Supercolonies of billions in an invasive ant: What is a society? Mark W. Moffett en *Behavioral Ecology* (en prensa).

INTRODUCCIÓN

El despertar del pensamiento

En cooperación con antropólogos, genetistas y neurólogos, los arqueólogos intentan reconstruir los orígenes de nuestro pensamiento y, con ello, el inicio de nuestras sociedades, tradiciones y culturas. Tales investigaciones constituyen los pilares de un prometedor enfoque multidisciplinar: la arqueología cognitiva

Karin Schlott

PUEDE QUE TODO EMPEZASE HACE DOS MILLONES Y MEDIO de años con un *Australopithecus* que, al mordisquear con mala fortuna una nuez, se partió un diente. Quizá fue entonces cuando la necesidad despertó al ingenio y, por vez primera, aquel remoto antepasado nuestro decidió emplear una piedra para cascar el fruto. Y, ¿quién sabe?, tal vez al hacerlo se desprendiesen del guijarro algunas esquirlas con las que, más tarde, aprendió a desmembrar presas.

Así o de manera semejante pudo haber comenzado la historia cultural del hombre. En cualquier caso, con tan revolucionaria innovación (la fabricación intencionada de una herramienta) dio comienzo el Paleolítico. Por entonces ya habían transcurrido unos cuatro millones de años desde que nuestros primeros antepasados se separaron de la rama de los simios antropomorfos y evolucionaron hasta convertirse en prehomínidos, o australopitecinos. Más tarde, de estos descenderían los primeros homínidos que, con *Homo ergaster*, abandonaron el continente africano hace 1,9 millones de años.

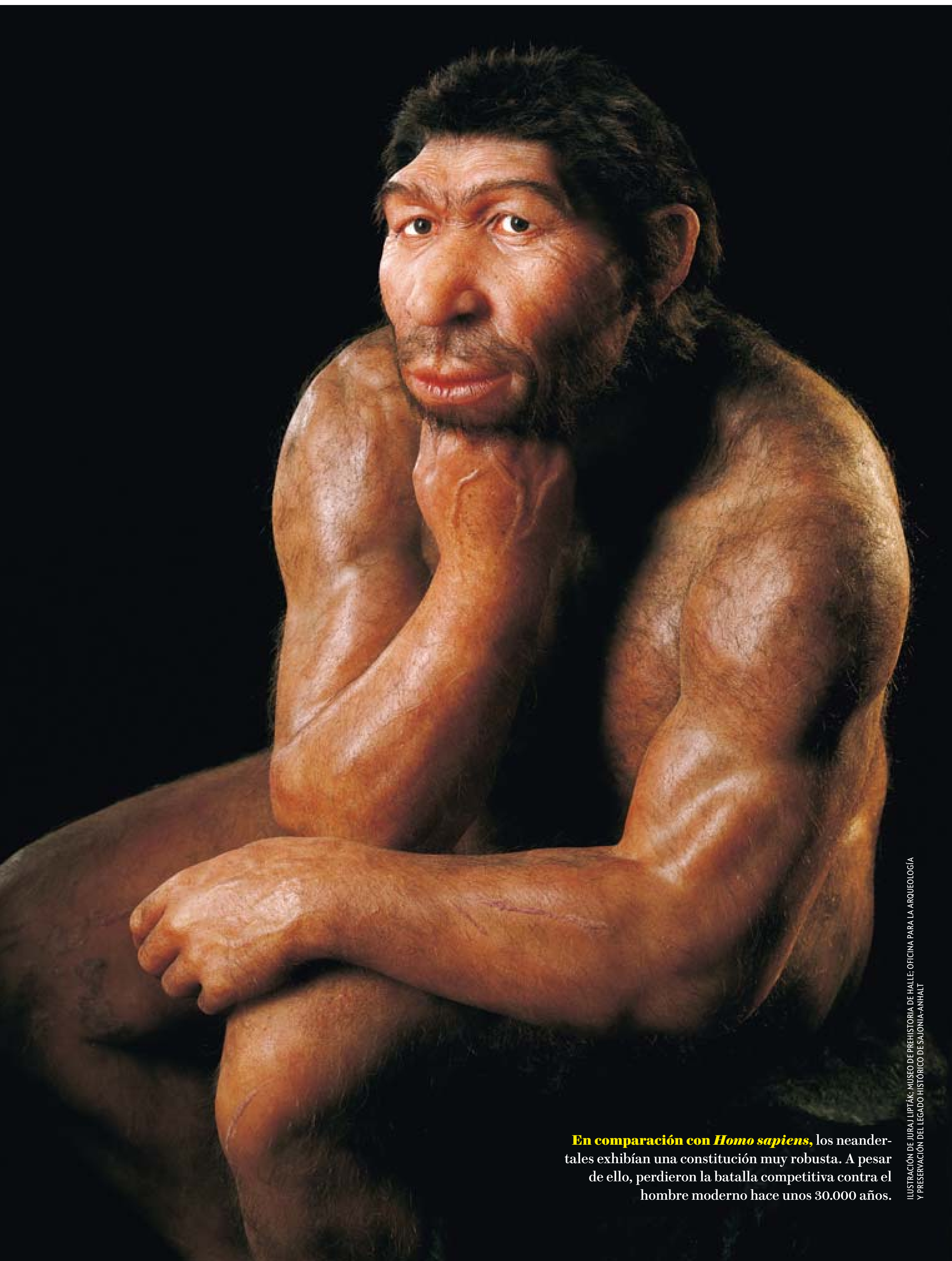
El proceso evolutivo que condujo a la aparición del hombre moderno no siguió una trayectoria lineal. Entre los australopitecinos se encontraban también especies más robustas, los «hombres cascanueces», cuya evolución continuó por una senda independiente de la del género *Homo*. En vez de utensilios líticos, usaban sus poderosas mandíbulas para partir los alimentos duros. Finalmente, solo los homínidos consiguieron adaptarse al entorno; un desarrollo que culminó hace 200.000 años con la aparición de *Homo sapiens*.

Esos millones de años de evolución establecieron los requisitos indispensables para el salto cultural del hombre. Desde comienzos del Paleolítico, el encéfalo había ido incrementando paulatinamente su tamaño; algunas regiones cerebrales sufrieron cambios genéticos y aumentaron su eficiencia. Todo ello permitió el desarrollo de facultades cognitivas extraordinarias: la capacidad para la planificación, el diseño creativo o el habla, así como la competencia para aprender nuevas técnicas y combinarlas. Todas esas facultades se encuentran asociadas a la evolución de nuestro cerebro.

Sin embargo —y a menos que, a falta de haber hallado otra clase de objetos, contemos con una visión distorsionada de aquella época—, parece que nuestros predecesores se limitaron durante largo tiempo a aplicar dichas capacidades a la fabricación de utensilios de piedra y al uso del fuego. La diversidad cultural comenzó hace 300.000 años, después de que, según los cálculos actuales, el 90 por ciento de la historia evolutiva del hombre ya hubiera transcurrido. Entonces, nuestros antepasados aprendieron nuevas técnicas líticas, inventaron un pegamento sintético y elaboraron diversos tipos de herramientas hasta entonces desconocidas.

Hace 40.000 años, mucho después de que *Homo sapiens* ya hubiera adquirido sus rasgos anatómicos modernos, llegó a Europa una revolución cultural. Provenientes de África, los humanos comenzaron a agruparse en sociedades complejas, crearon objetos artísticos, pintaron las paredes de sus cavernas y entonaron las primeras melodías musicales. Poco después, *Homo sapiens* había desplazado a los últimos representantes contemporáneos de su propio género, los neandertales.

Karin Schlott es profesora de arqueología en la Universidad de Heidelberg



En comparación con *Homo sapiens*, los neandertales exhibían una constitución muy robusta. A pesar de ello, perdieron la batalla competitiva contra el hombre moderno hace unos 30.000 años.

ILUSTRACIÓN DE JURAJ LIPTÁK; MUSEO DE PREHISTORIA DE HALLE; OFICINA PARA LA ARQUEOLOGÍA Y PRESERVACIÓN DEL LEGADO HISTÓRICO DE SAJONIA-ANHALT



Miriam Noël Haidle es coordinadora del proyecto de investigación «El papel de la cultura en las primeras expansiones humanas» de la Academia Científica de Heidelberg. Enseña e investiga en el campo de la arqueología cognitiva.

PALEOGENÉTICA

Genética de la cognición

La secuenciación del genoma humano avivó la esperanza de entender mejor el desarrollo cognitivo de nuestra especie. Hoy, sin embargo, las principales preguntas siguen aún sin respuesta

Miriam Noël Haidle

A lo largo de los dos últimos millones de años, el cerebro humano ha triplicado su tamaño y, con ello, su complejidad neuronal. Durante décadas, los expertos han intentado desentrañar las características anatómicas y fisiológicas de la evolución cerebral. La genética había prometido revelárselas: en 2003 se descifró el genoma completo del hombre moderno; dos años más tarde se comparó con el de nuestro pariente vivo más cercano, el chimpancé [*véase* «¿Qué nos hace humanos?», por K. S. Pollard; Investigación y Ciencia, julio de 2009], y en 2010, el grupo de investigación liderado por Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, presentó la primera versión del genoma del neandertal, del que se había secuenciado un 60 por ciento. Tras un decenio de grandes avances, la genética ofrecía un número incalculable de posibilidades para seguir la pista al origen de la cognición humana.

Gracias a la comparación de nuestro genoma con el de los primates y otras especies animales, los expertos en paleogenética han podido confirmar que el genoma humano ha cambiado en numerosos aspectos a lo largo de la evolución. Emergieron nuevos genes, otros desaparecieron y algunos se modificaron. Sin embargo, las consecuencias de estos cambios aún no se comprenden bien; sobre todo, en lo que respecta a la funcionalidad de los genes asociados. Son pocas las ocasiones en las que se han extraído conclusiones definitivas, como ha ocurrido en el caso de los genes que controlan los receptores olfativos en algunos primates y, en particular, en el hombre. Hoy sabemos que la evolución redujo su número. Se cree que ello obedece a que nuestros antepasados fueron dependiendo cada vez menos del sentido del olfato, tanto para buscar comida como para interaccionar con otros miembros de su especie.

Sabemos también que en la historia temprana de la humanidad apareció un gen que implicó una notable mejora para nuestros órganos sensoriales. Como todos los catarrinos, el hombre posee en la retina tres pigmentos que posibilitan la visión del color. El resto de los mamíferos, en cambio, solo cuentan con dos. Cada uno de estos pigmentos es sensible a un intervalo de lon-

EN SÍNTESIS

Aunque hoy sabemos que el genoma humano ha cambiado de diversas maneras a lo largo de la evolución, el origen de dichas modificaciones continúa siendo un misterio.

Se conocen numerosos genes relacionados con facultades cognitivas. Estas, sin embargo, parecen obedecer a factores más complejos que los dictados por un único gen.

Genes únicos

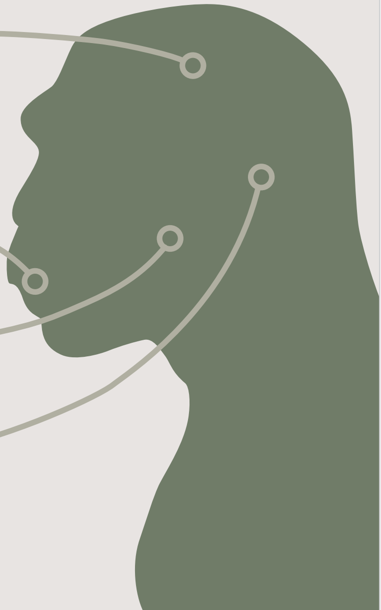
En el núcleo de cada célula somática se encuentra toda nuestra herencia genética, repartida en 23 pares de cromosomas. Cada cromosoma consta de una cadena de ácido desoxirribonucleico (ADN), cuya estructura toma la forma de una doble hélice. En ella se suceden las bases adenina, guanina, citosina y timina, dispuestas en pares cuya secuencia determina toda la información genética. Ciertas porciones de esta cadena, denominadas genes, codifican proteínas; estos constituyen en torno al 1,5 por ciento del genoma. Poseemos más de 20.000 genes, aunque se desconoce el número exacto. Algunos de ellos desempeñan funciones de especial relevancia cognitiva.

Secuencia HAR1
Actúa sobre el cerebro y, bajo ciertas condiciones, resulta necesaria para el desarrollo de la corteza cerebral, muy desarrollada en *Homo sapiens*.

Genes *FOXP2* y *SRPX2*
Facilitan la articulación y el habla.

Gen *MAOA*
Controla el metabolismo de los neurotransmisores.

Gen *ASPM*
Controla el tamaño cerebral y el desarrollo del habla.



gitudes de onda. Solo tras la duplicación y posterior modificación del gen que controlaba la visión de las longitudes de onda medias comenzó el hombre a percibir longitudes de onda mayores. De esta manera pudo distinguir, además del azul y el verde, también el rojo. Ello le permitió diferenciar en la distancia los frutos maduros de los verdes, lo que supuso una ventaja importante en la batalla diaria por la alimentación.

Otras mutaciones quedan mucho más lejos de nuestra comprensión, por no hablar de aquellas que desconocemos por completo. En el ámbito de la cognición humana, un ejemplo que ha recibido especial atención lo proporcionan las modificaciones de los pares de bases del gen *FOXP2*. Este despertó un gran interés tras las investigaciones que, en 1998, los expertos del Hospital Radcliffe de Oxford llevaron a cabo sobre una familia londinense, conocida desde entonces como «familia KE». Aunque todos sus miembros gozaban de perfecta salud mental, muchos de ellos padecían trastornos del habla. Estos se debían a una mutación del gen *FOXP2* que, entre otros síntomas, provocaba alteraciones en el control de los movimientos de la boca y en la elaboración mental del habla.

Dado que el habla guarda un vínculo muy estrecho con el desarrollo cultural del hombre, los expertos en paleogenética de Leipzig y Oxford decidieron en 2002 comparar el desarrollo del gen *FOXP2* en el chimpancé, el orangután, el gorila, el macaco y el ratón. Confirmaron que, en el caso del ser humano, habían ocurrido tres cambios en la sucesión de pares de bases. Dos de esas mutaciones aparecieron después de que la línea del chimpancé se separase de la humana. Este gen sufrió además una fuerte selección, lo que significa que, gracias a dichos cambios, nuestros antepasados pudieron adaptarse mejor al medio. En 2002, algunas estimaciones parecían indicar que tales modificaciones habrían tenido lugar durante los últimos 200.000 años, por lo que se encontrarían ligadas de manera muy directa al éxito cultural del hombre anatómicamente moderno. El «gen del habla» se hallaba de repente en boca de todos.

Pero con el tiempo llegó el desencanto. Análisis complementarios mostraron que, si bien el gen *FOXP2* afecta al desarrollo cerebral y conforma las bases neuronales implicadas en el habla, también influye durante la fase embrionaria en otros órganos, como el pulmón, el corazón y el intestino. Por tanto, no queda claro qué efectos supusieron las mutaciones de dicho gen para los humanos, ya que estas aparecen en lugares distintos de los observados en la familia KE. Además, los trastornos en la producción y elaboración del habla muy pocas veces pueden remitirse a este gen: desde entonces, se ha descubierto que en el proceso intervienen también otros genes. *FOXP2* no es el gen del habla, sino un componente más del complejo conjunto de factores que conforman nuestra capacidad para hablar.

Entretanto, los investigadores han confirmado que *FOXP2* no protagonizó la diferencia clave que separó a *Homo sapiens* del resto de los primates y aseguró su éxito. En 2007, Pääbo demostró que los neandertales mostraban las mismas diferencias genéticas en *FOXP2* que el hombre moderno. Estas mutaciones, pues, debieron de darse hace entre 400.000 y 300.000 años como mínimo, mucho antes de lo que se suponía.

Cada año, los expertos identifican más regiones funcionales de genes relacionados con el desarrollo cognitivo del hombre. Algunos cambios genéticos se remontan a la base del árbol genealógico de los primates; otros ocurrieron más tarde, durante la evolución del género *Homo*. Poco a poco, se van descubriendo nuevas funciones de genes y las interacciones que existen entre ellos. Pero, en el proceso, solo hemos podido dar algo por cierto: no existió una única modificación genética que, desde un punto de vista cognitivo, nos separase de nuestras especies hermanas.

PARA SABER MÁS

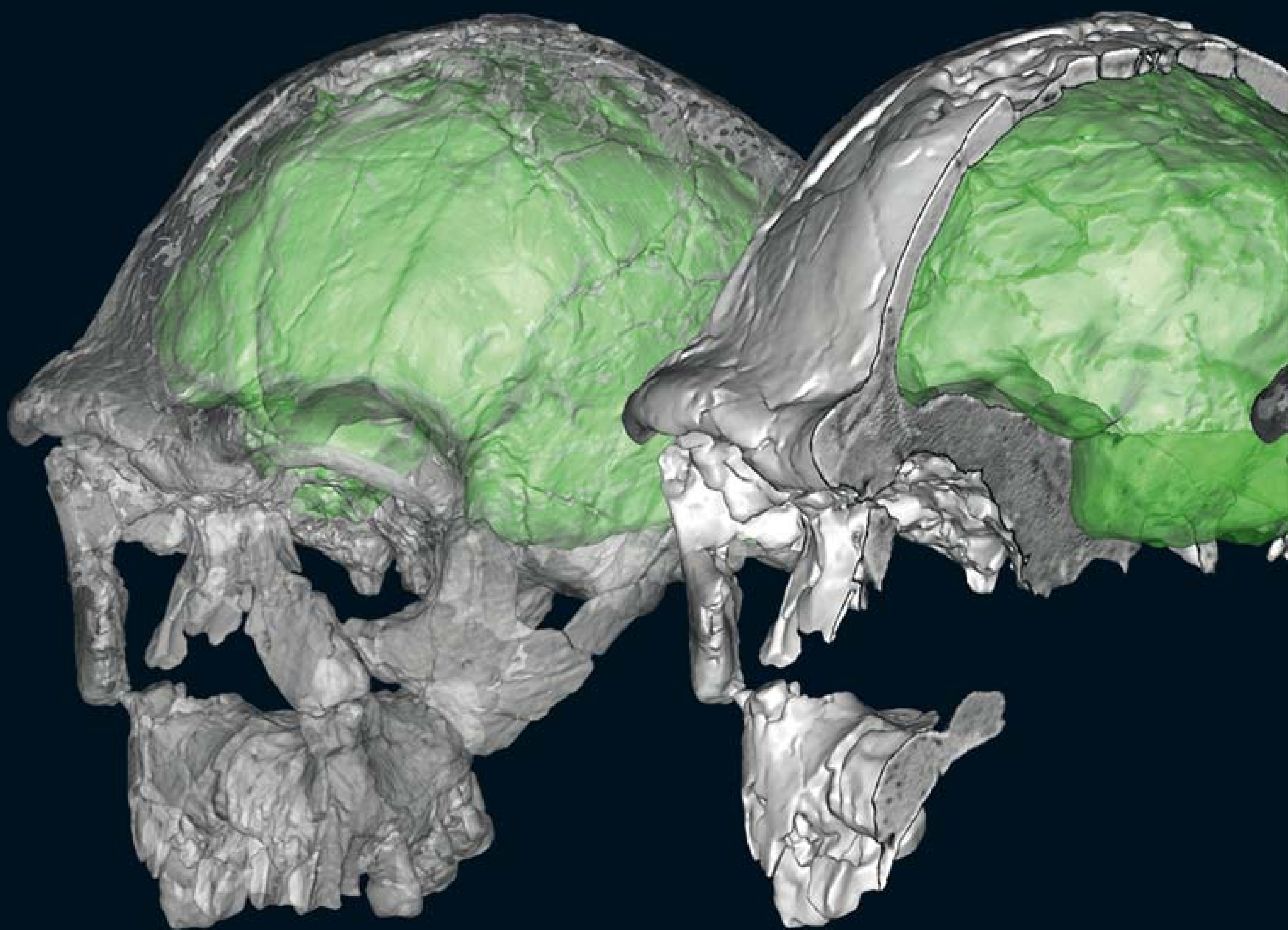
The derived FOXP2 variant of modern humans was shared with neandertals. J. Krause et al. en *Current Biology*, vol. 17, n.º 21, noviembre de 2007.
Genetic basis of human brain evolution. E. J. Vallender, N. Mekel-Bobrov y B. T. Lahn en *Trends in Neurosciences*, vol. 31, n.º 12, diciembre de 2008.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA/EPOC

PALEONEUROLOGÍA

La evolución cerebral de los homínidos

Emiliano Bruner





Emiliano Bruner, doctor en biología animal, lidera el grupo de investigación en paleoneurobiología del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) de Burgos. También es profesor adjunto de paleoneurología en la Universidad de Colorado en Colorado Springs.

TODAS LAS IMÁGENES SON CORTESÍA DE E. BRUNER Y J. M. DE LA CUÉTARA (CENIEH)

Las técnicas digitales, que permiten reconstruir el molde de la cavidad craneal de especies fósiles, arrojan nueva luz sobre la evolución anatómica de nuestro cerebro y su relación con los cambios cognitivos

Reconstrucción digital del molde cerebral (*verde*) del individuo KNM-ER 3733, un representante de la especie *Homo ergaster* que vivió en África Oriental hace unos dos millones de años. Los moldes digitales aportan gran cantidad de información sobre la anatomía cerebral de las especies extintas.

L CEREBRO CONSTITUYE EL ELEMENTO ANATÓMICO más peculiar de nuestra especie. Sin embargo, es quizá también el menos conocido. A pesar de los todos los progresos que hemos logrado durante el último siglo, su complejidad sigue escapando al análisis e interpretación de numerosas disciplinas. Conocer los procesos que han moldeado nuestro cerebro a lo largo de la evolución reviste una gran utilidad a la hora de formular hipótesis sobre su funcionamiento y su organización, así como sobre sus posibilidades y sus límites. En este programa de investigación, el único recurso del que disponemos proviene del estudio de la morfología cerebral de las especies extintas.

Aunque los primeros fósiles humanos fueron hallados a mediados del siglo XIX (*Homo neanderthalensis*, en Europa, seguidos por los primeros restos de *Homo erectus*, en Asia), la paleoantropología no se desarrollaría como ciencia reconocida hasta los años treinta del siglo XX. En 1924, el neuroanatomista Raymond Dart encontró en África el primer cráneo de *Australopithecus africanus*, un individuo infantil conocido como Niño de Taung. En el hallazgo de aquel australopiteco concurrieron dos características muy peculiares: no solo fue descubierto por un especialista en anatomía cerebral, sino que, por una rarísima situación de fosilización, el sedimento geológico había penetrado en el cráneo y se había compactado. Los huesos de la bóveda craneal habían desaparecido y lo que quedaba era un molde fósil de su cerebro. Por esta sugestiva coincidencia, podemos afirmar que la paleoneurología humana (el estudio de las estructuras cerebrales de los homínidos fósiles) nació a la vez que la paleoantropología misma.

Durante largo tiempo, la evolución humana se entendió desde una perspectiva lineal, gradual y progresiva. Hoy en día, sin embargo, no creemos que esa *scala naturae* refleje el verdadero proceso de evolución biológica. En primer lugar, esta no es siempre lineal, sino que a menudo sigue caminos discontinuos y complejos. Tampoco obedece siempre a un proceso gradual, pues a veces puede presentar largos períodos de ausencia de cambio junto a otros en los que las transformaciones se suceden con gran rapidez. Y quizá tampoco recorra siempre un sendero de mejora absoluta, ya que numerosos rasgos que pueden resultar útiles para ciertas funciones quizá no lo sean para otras. Las necesidades de las especies cambian continuamente, por lo que una trayectoria evolutiva que procediese siempre en la misma dirección carecería de sentido. Hoy, esta nueva interpretación de la teoría evolutiva ha permeado todos los sectores de la biología, incluida la paleontología humana. A la luz de la gran cantidad de fósiles hallados durante el desarrollo de la disciplina, la historia de la evolución del hombre ha pasado de verse como una línea para convertirse en un «árbol» y, finalmente, en un «arbusto», donde las relaciones completas entre sus numerosas ramas están aún por descubrir.

En ese contexto, la paleoneurología investiga la evolución del sistema cerebral de las especies extintas. Sin embargo, dado que el encéfalo no fosiliza, la reconstrucción de las estructuras cerebrales debe realizarse a partir de las huellas que estas han dejado en los huesos del cráneo. Para ello resulta necesario entender, en primer lugar, las relaciones anatómicas existentes entre ambos: cerebro y cráneo guardan relaciones estructurales (los dos se tocan, por lo que deben respetar equilibrios físicos y mecánicos) y funcionales (comparten recursos fisiológicos), vínculos que hoy se investigan sobre todo en individuos vivos.

El estudio paleoneurológico se centra, por tanto, en la anatomía de la cavidad craneal, o *endocráneo*. Esta nos aporta información sobre el tamaño del cerebro, su geometría, la proporción que guardan sus áreas (lóbulos y circunvoluciones) e incluso sobre su sistema vascular superficial, ya que también las venas y arterias dejan huellas sobre la pared interna del cráneo. A partir de esos datos, la paleoneurología trata de descifrar la manera en que estas características se han ido modificando a lo largo de la evolución, con un interés particular por su relación con posibles cambios cognitivos.

MOLDES PARA EL CEREBRO

En el pasado, una vez se hallaba un cráneo fósil, el método tradicional para proceder al estudio del endocráneo consistía en la elaboración de un molde físico, un «positivo» de la cavidad craneal que reflejase la apariencia exterior del cerebro. Sin embargo, todo fósil constituye un objeto único y muy delicado, por lo que esta técnica no podía permitirse emplear procesos físi-

EN SÍNTESIS

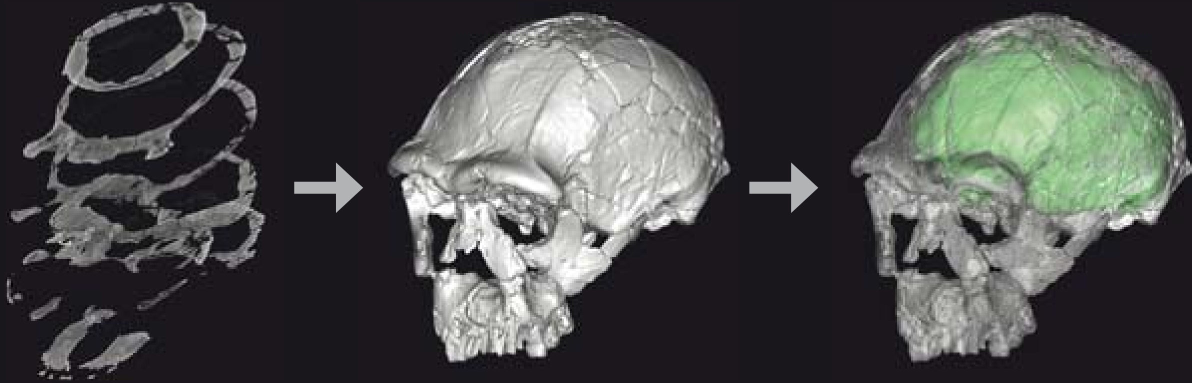
La paleoneurología humana estudia la evolución del sistema cerebral de los homínidos. Los moldes endocraneales de las especies fósiles permiten deducir varios aspectos anatómicos del cerebro, como sus lóbulos, circunvoluciones o irrigación vascular.

Durante los últimos años, las técnicas digitales han revolucionado el proceso de obtención de moldes. Al mismo tiempo, el tratamiento estadístico de los datos ha mejorado de manera notable los modelos evolutivos del sistema cerebral.

La integración de estos avances con otras disciplinas, como la arqueología o la neurociencia, ha permitido formular hipótesis novedosas sobre la relación entre la evolución anatómica del cerebro y los cambios cognitivos en el género *Homo*.

Obtención de un molde endocraneal

Las nuevas técnicas digitales que emplea la paleoneurología permiten estudiar un cráneo fósil con gran precisión y sin que este corra el mínimo riesgo de resultar dañado.



1. Mediante tomografía computarizada se obtienen secciones bidimensionales del cráneo fósil.

2. Se ensamblan luego las secciones para generar la reconstrucción virtual del cráneo.

3. Por último, se obtiene el molde digital de la cavidad endocraneal (*verde*), con una precisión de décimas de milímetro.

cos o químicos demasiado agresivos. Solo si un fósil se encontraba muy fragmentado resultaba sencillo elaborar el molde, pero entonces este no aportaba demasiada información. Y, ante un cráneo completo, fabricar un molde y extraerlo sin dañar el primero ni deformar el segundo era un proceso que revestía grandes dificultades. Con todo, durante el siglo xx se desarrollaron técnicas cada vez mejores. En un principio se emplearon moldes de yeso; después, se introdujeron resinas y compuestos plásticos. Sin embargo, la investigación con moldes físicos siempre había limitado de manera considerable el grado de desarrollo de la disciplina.

En este sentido, la paleoneurología vivió una verdadera revolución a mediados de los años noventa. Esta llegó de la mano del alto grado de desarrollo que, durante esos años, experimentaron los métodos de obtención de imágenes digitales biomédicas. La tomografía computarizada y las técnicas de resonancia magnética alcanzaron un nivel de difusión que trascendió el ámbito de la medicina; de repente, estas técnicas se encontraban al alcance de cualquier laboratorio anatómico y paleontológico.

La elaboración de moldes endocraneales experimentó un progreso sin precedentes: por primera vez, podían construirse moldes digitales sin tocar el fósil. Hoy en día, el proceso de obtención de moldes es rápido y versátil, y la correspondencia entre la anatomía original y la geometría del molde alcanza las décimas de milímetro. Cuando los fósiles se encuentran incompletos o fragmentados, resulta posible emplear aplicaciones estadísticas a fin de minimizar la componente subjetiva de la reconstrucción. A su vez, los moldes digitales pueden copiarse y enviarse con gran facilidad, con las ventajas que ello supone para la colaboración entre laboratorios.

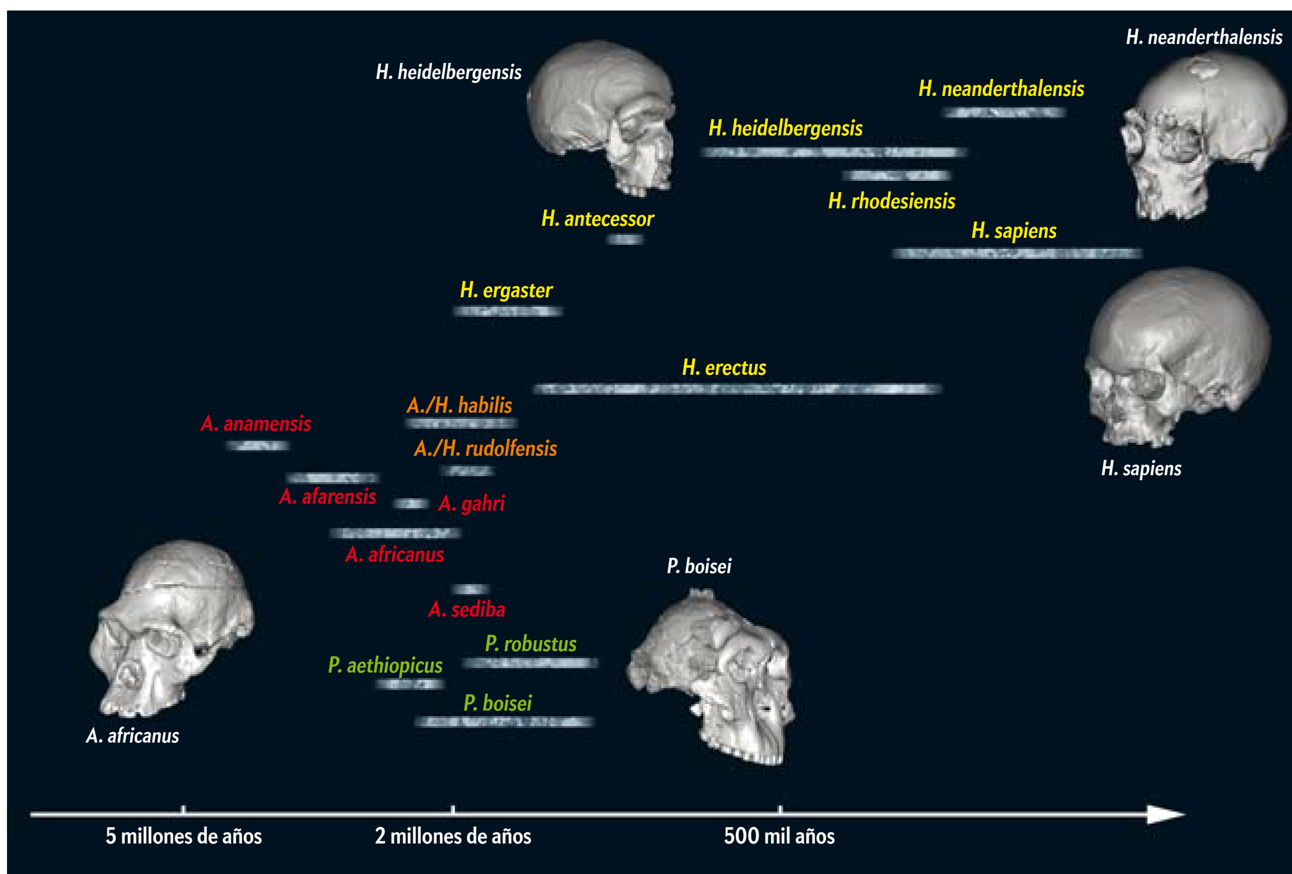
Al mismo tiempo que las técnicas de imagen digital proporcionaban nuevas herramientas para la obtención de datos paleontológicos, los avances informáticos revolucionaron también la morfometría, la disciplina que, a través de la estadística, cuantifica y compara las formas anatómicas. En lugar de medir físicamente las distancias entre los puntos de un sistema anatómico (anchuras, longitudes, etcétera), como ha venido haciéndose durante dos siglos de estudios antropométricos, hoy se trabaja con modelos geométricos digitales. Estos se analizan luego con métodos de estadística multivariante (un tipo de estadística que analiza las correlaciones entre todos los elementos a la vez) a fin de identificar los patrones de estructura y función que se esconden tras un modelo biológico. Este tipo de análisis espacial, denominado morfometría geométrica, constituye en la actualidad el método principal para el estudio de la morfología en biología evolutiva.

Hoy, un laboratorio de paleoneurología es un laboratorio de anatomía digital: un conjunto de ordenadores aplicados a la reconstrucción virtual de cráneos y cerebros de especies extintas, que analizan su variabilidad y que investigan los patrones evolutivos que han caracterizado los cambios neurales, con especial interés por aquellos con implicaciones cognitivas. Los conocimientos necesarios son los de la biología, la paleontología, la bioestadística y las técnicas digitales de reconstrucción anatómica. Todo ello forma parte de lo que ha dado en llamarse *biología in silico*, que, en lugar de emplear modelos animales (*in vivo*) o fisicoquímicos (*in vitro*), lleva a cabo sus experimentos en un ordenador.

En el laboratorio de paleoneurología del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) de Burgos empleamos estas técnicas con el objetivo de formular hipótesis novedosas sobre la evolución del cerebro y el cráneo de los homínidos, así como sobre las relaciones anatómicas existentes entre ambos. Muchas de las investigaciones que allí desarrollamos versan sobre nuestra propia especie, con el objetivo de interpretar después el registro fósil asociado al género *Homo* a la luz de la variabilidad y los procesos evolutivos que han venido caracterizando a las especies humanas desde hace dos millones de años.

GRANDES CEREBROS

De todos los datos que pueden extraerse a partir de un molde endocraneal, uno de los que más atención ha recibido en el pa-



Los homínidos más abundantes en el registro fósil pertenecen a los géneros *Homo* (*H*), *Australopithecus* (*A*) y *Paranthropus* (*P*). La subdivisión de esta familia en especies ha sido objeto de constante debate, por lo que muchas de las relaciones filogenéticas propuestas no pasan de ser meras hipótesis. Las barras indican el período cronológico aproximado en el que se cree que vivió cada grupo; los cráneos (*reconstrucciones digitales*) representan algunos fósiles clave de los tres géneros.

sado ha sido el volumen. En parte, ello se debe a las grandes diferencias observadas en el volumen cerebral de los mamíferos y, muy en particular, en el de los primates. De hecho, nuestra especie destaca en este sentido: un humano moderno posee en torno al triple de masa neural que un primate de peso corporal parejo.

Con todo, no podemos ignorar otro de los factores que han contribuido a aumentar la importancia que tradicionalmente se ha asignado al tamaño cerebral: en términos estadísticos, se trata de un dato aparentemente fácil de calcular. Durante décadas, se han llenado cráneos con semillas o se han introducido los moldes correspondientes en agua para medir el volumen de la cavidad endocraneal. Aunque hoy en día se emplean métodos digitales, a menudo estos tampoco se encuentran exentos de ambigüedades. La mayoría de los restos fósiles se componen de fragmentos aislados de cráneo, en cuyo caso el volumen cerebral solo puede calcularse de manera aproximada. Y si bien existen varios métodos empíricos para extrapolar su valor, el resultado final varía mucho de una estimación a otra, una circunstancia que ha generado encendidos debates sobre la validez de las reconstrucciones.

Tras una época en la que se concedió gran importancia al valor absoluto de la capacidad craneal, se comenzó a prestar atención a su valor relativo. La propuesta, no obstante, desató nuevos problemas métricos. Por lo general, en zoología suele calcularse el volumen cerebral con relación al tamaño del animal. Pero los estudios paleontológicos adolecen de la limitación usual: no disponemos del cuerpo completo, sino solo de fragmentos de esqueleto. Los métodos empíricos para estimar el peso corporal a partir del esqueleto han desembocado, a su vez, en nuevas controversias. Por lo demás, otros tipos de mediciones de la capacidad craneal empleados en zoología, como los que la calculan con respecto al gasto energético u otros parámetros metabólicos, no suponen en paleontología más que una aportación estrictamente teórica.

Hoy sabemos que, a lo largo de la evolución humana, el proceso de encefalización (el aumento relativo del volumen cerebral) ha ocurrido en diferentes momentos y, con toda probabilidad, en líneas evolutivas independientes. Algunas especies solo han experimentado un aumento del valor absoluto del tamaño cerebral, acompañado de un incremento proporcional del volumen del cuerpo. En otras, por el contrario, solo ha variado el tamaño del encéfalo, sin cambios corporales. Los australopitecos contaban con un volumen cerebral similar o poco mayor al de los simios antropomorfos actuales, con un promedio de entre 400 y 500 centímetros cúbicos (cc). Los primeros humanos, como *Homo habilis* y *Homo ergaster*, alcanzaban entre 600 y 800 cc. De hecho, a fin de poder incluir a *Homo habilis* en nuestro género, en su momento se decidió fijar su capacidad craneal como el mínimo necesario para considerar humana a una especie; una suerte de «Rubicón cerebral» que marcase la frontera del género *Homo*. Otras especies, como *Homo erectus* y *Homo heidelber-*

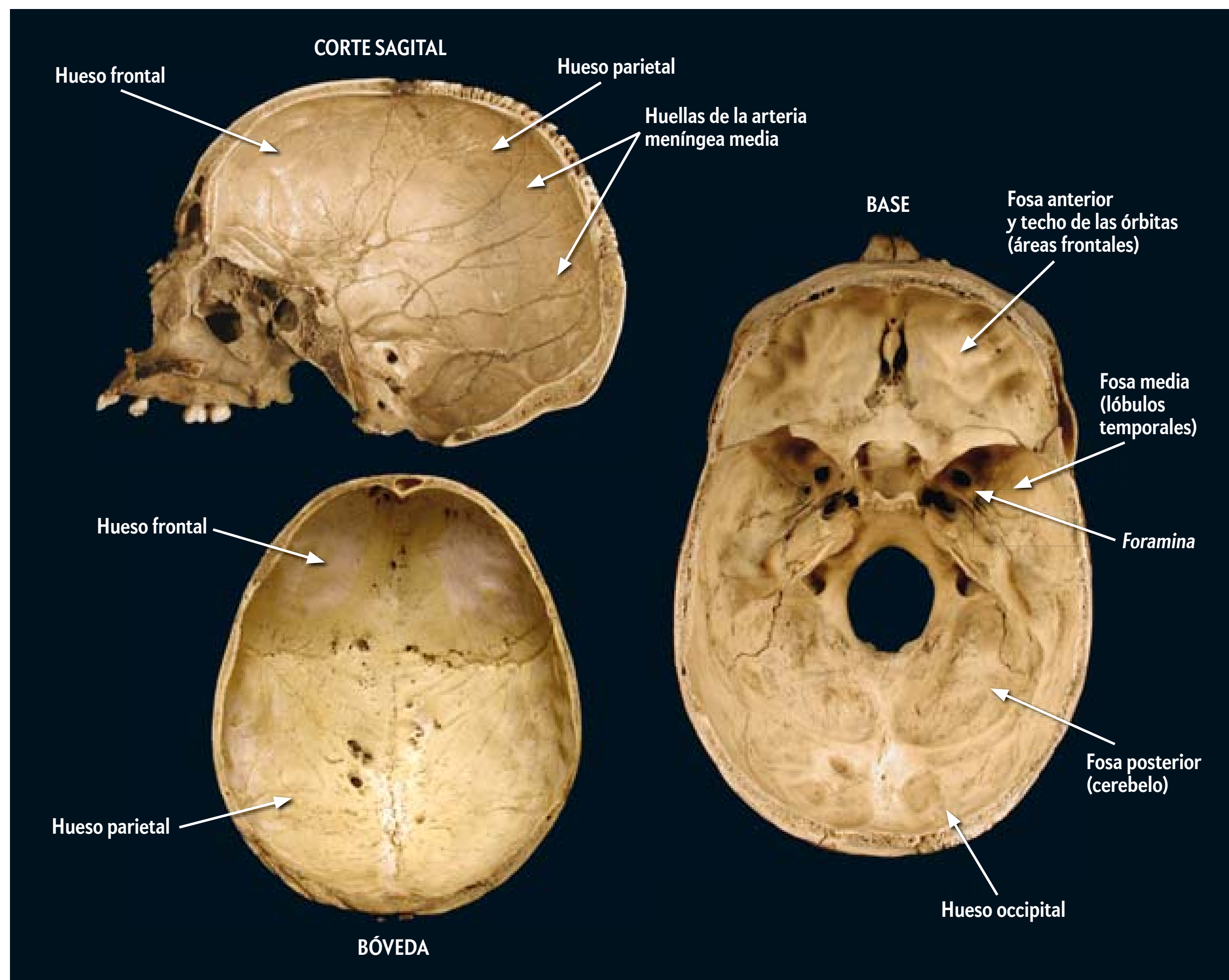
gensis, llegaron a poseer cerebros de entre 1000 y 1200 cc. Los humanos modernos y los neandertales presentan los valores más altos, entre 1300 y 1500 cc. Es más, el promedio de *Homo neanderthalensis* era algo más elevado que el de nuestra especie.

Mención aparte merece el caso del Hombre de Flores, un individuo fósil descubierto en 2003 en la isla de Flores, en Indonesia, y datado en unos 20.000 años de antigüedad. Con un metro de altura, su capacidad craneal no llegaba a los 400 cc. Su pequeño tamaño y sus particulares rasgos anatómicos, junto a una datación tan reciente y una industria lítica compleja, han planteado una infinidad de preguntas relativas a nuestra comprensión de los procesos evolutivos. Sobre todo, han quedado en evidencia una vez más lo poco que sabemos sobre la anatomía craneal y cerebral de nuestra propia especie. A pesar de una atención desproporcionada por parte de los medios de comunicación y de un encendido debate académico —a menudo, en un tono innecesariamente conflictivo—, aún no sabemos si el Hombre de Flores constituye un ejemplar de una especie extinta, ajena por completo a los esquemas evolutivos que conocemos, o si no era más que un individuo patológico [*véase* «Nueva luz sobre el hombre de Flores», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, enero de 2010].

Hoy en día, el tamaño cerebral recibe menos atención que antaño. No cabe duda de que se trata de un dato relevante, pero otros factores más sutiles bien podrían haber resultado más determinantes en la evolución de nuestro cerebro. Y aunque algunos autores han hallado cierta correlación entre tamaño cerebral (absoluto y relativo) e «inteligencia», otros sugieren cautela en este sentido. Muchos de tales estudios se basan en la comparación de nuestra especie con otros simios antropomorfos actuales, un enfoque que requiere cierta precaución. Al igual que nosotros, ellos también han evolucionado durante varios millones de años a partir de un ancestro común; sin embargo, desconocemos su trayectoria evolutiva. Por ello, quizá suponga un error dar por sentadas demasiadas similitudes entre un simio actual y un estado biológico primitivo de nuestra especie. En palabras de Ralph Holloway, antropólogo de la Universidad de Columbia de Nueva York y padre de la paleoneurología moderna, «un centímetro cúbico de un cerebro humano no equivale a un centímetro cúbico en el cerebro de un chimpancé».

UN CRÁNEO, UN CEREBRO

A lo largo de la morfogénesis (la formación de los elementos anatómicos en un individuo), podemos distinguir entre los cam-



Los cráneos no solo permiten reconstruir la cavidad endocraneal (el espacio ocupado por el cerebro), sino también los pasajes (*foramina*) de nervios y vasos, la forma y la posición de lóbulos y circunvoluciones, e incluso el sistema vascular superficial. Estas secciones muestran un corte sagital, la bóveda y la base del cráneo de un hombre moderno.

bios de tamaño, a los que llamamos *crecimiento*, y los de forma, denominados *desarrollo*. En estos dos procesos, cerebro y cráneo se afectan mutuamente como consecuencia de los genes que comparten, de los elementos anatómicos que se encuentran en contacto y de las funciones comunes que ambos han de integrar. Como resultado, cada elemento influye en la forma y tamaño del otro, razón por la que podemos emplear el cráneo como testigo de la anatomía cerebral.

Ya los primeros estudios paleoneurológicos prestaron atención a los rasgos del endocráneo que se hallaban relacionados de manera directa con las estructuras de la superficie cerebral. En la base del cráneo, por ejemplo, pueden apreciarse los orificios por los que se introducen los nervios que penetran en el cerebro. También dejan huellas las arterias y las venas que se dirigen a las meninges. Una de las líneas de investigación de nuestro grupo incluye, de hecho, el estudio del sistema vascular cerebral. Se trata de un aspecto que reviste un interés especial, puesto que permite formular, entre otras, algunas hipótesis relacionadas con la actividad metabólica del cerebro.

El patrón anatómico del sistema venoso se muestra bastante similar en todos los homínidos, tanto los actuales como los extintos. Se conocen, no obstante, algunas variaciones, lo que ha llevado a proponer diferencias en los procesos de termorregulación cerebral. Consideraciones fisiológicas aparte, estos rasgos también se han utilizado para estudiar las relaciones existentes entre especies y poblaciones, ya que suelen trasmitirse genéticamente. De hecho, suelen emplearse en antropología forense y en arqueología para determinar el grado de parentesco entre individuos.

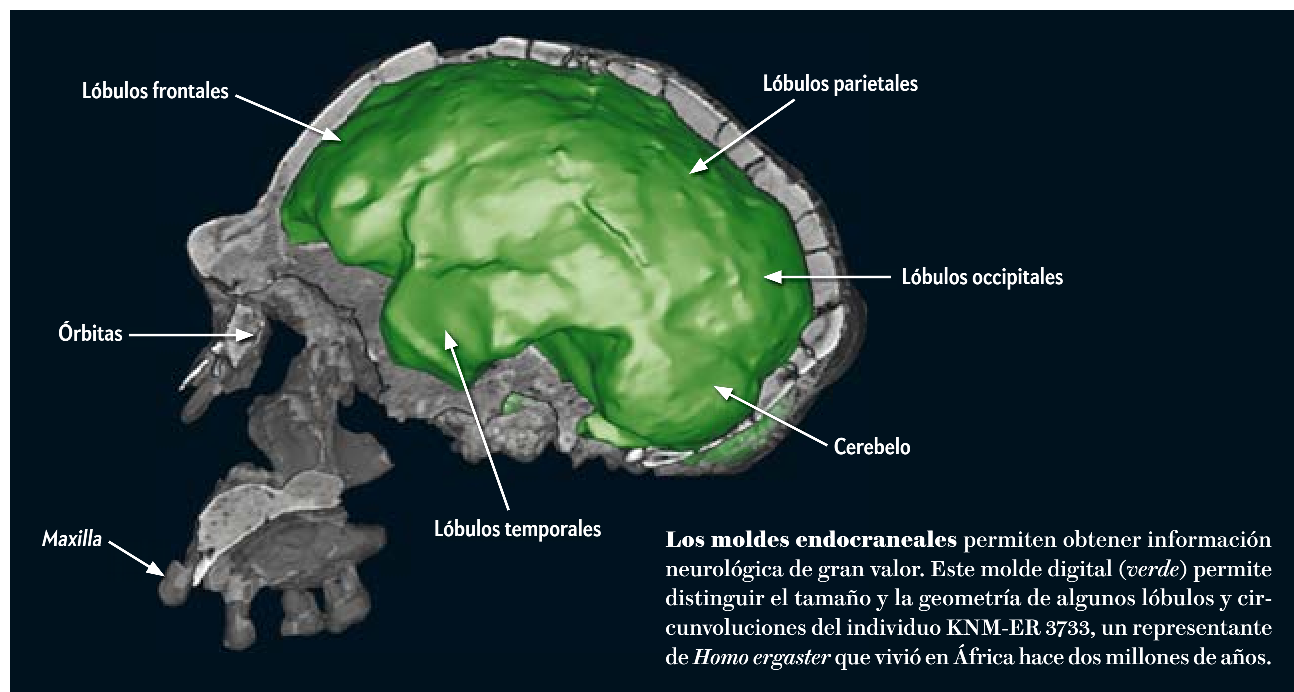
Quizá mayor interés revista el sistema arterial, puesto que exhibe bastantes variaciones entre las especies del genero *Homo*. Al comparar la arteria meníngea media en humanos fósiles y modernos, podemos apreciar cambios en la posición y la forma de estos vasos. Pero, sobre todo, llama la atención la complejidad vascular que exhibe nuestra especie, la cual presenta redes muy desarrolladas en comparación con las especies extintas. Dado que aún desconocemos numerosos aspectos relativos a la estructura y función de estos sistemas vasculares, ese aumento en el nivel de reticulación carece de una interpretación clara. Se ha propuesto que podría guardar relación con la regulación térmica del cerebro, con sus necesidades metabólicas o con la protección física de la corteza. Sin embargo, a pesar de todo lo que la evolución parece haber invertido en este sistema vascular, su función continúa siendo un enigma.

LOS ORÍGENES DE UN CEREBRO COMPLEJO

También las circunvoluciones cerebrales dejan sus huellas en la pared endocraneal. Estas trazas pueden ser muy débiles, por lo que a menudo se requiere cierta experiencia para interpretarlas. En el pasado se les ha concedido gran importancia, sobre todo al dar por sentado que a cada región cerebral debía corresponderle un aspecto cognitivo. Hoy sabemos que, aunque existan áreas cerebrales especializadas en funciones concretas, los procesos cognitivos se basan en la integración de varias redes neurales, por lo que no resulta aconsejable asociar de forma demasiado rígida funciones cognitivas a zonas cerebrales específicas.

No obstante, el frecuente vínculo entre daños cerebrales muy localizados y algunas disfunciones cognitivas sugiere que, con todo, algunos procesos dependen de «regiones críticas», las cuales habrían ido especializándose a lo largo de la evolución. Entre todas las zonas cerebrales, las que más atención han recibido en el pasado han sido las del lenguaje: el área de Broca (en los lóbulos frontales) y la de Wernicke (entre los lóbulos temporales y los parietales). Sin embargo, la estructura general de estas circunvoluciones cerebrales en todas las especies humanas extintas presenta un esquema muy similar a las del hombre moderno, y las posibles diferencias escapan a la resolución que pueden ofrecer los moldes endocraneales. En particular, también las áreas de Broca y de Wernicke pueden reconocerse en los moldes de los primeros humanos, como *Homo habilis* u *Homo ergaster*, los cuales datan de hace unos dos millones de años.

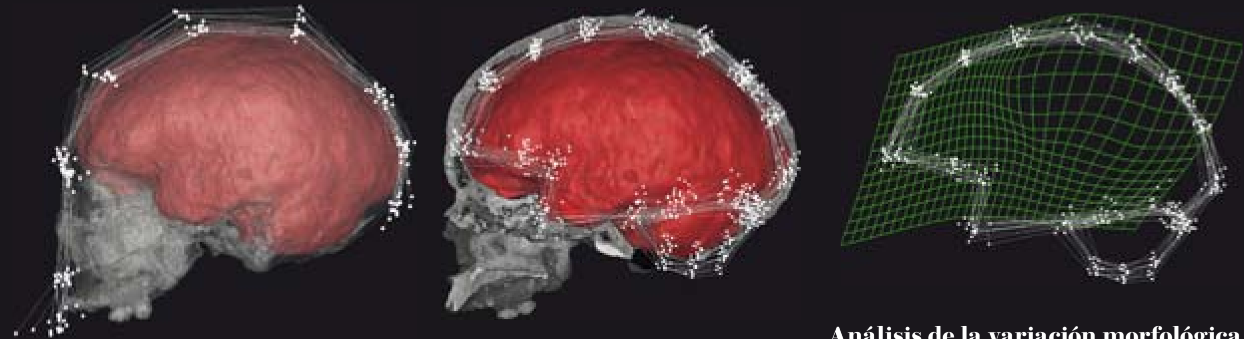
Bien es cierto que pueden observarse cambios en algunas proporciones, lo que sugiere variaciones en el volumen de de-



Los moldes endocraneales permiten obtener información neurológica de gran valor. Este molde digital (*verde*) permite distinguir el tamaño y la geometría de algunos lóbulos y circunvoluciones del individuo KNM-ER 3733, un representante de *Homo ergaster* que vivió en África hace dos millones de años.

Estudio de la variabilidad

Para estudiar las diferencias morfológicas entre dos individuos, primero se construyen modelos geométricos simples del cráneo y del cerebro a partir de los puntos anatómicos de mayor relevancia funcional. Después, se emplean técnicas de estadística multivariante (que analiza las relaciones de todos los elementos a la vez) para obtener el conjunto de reglas que, por razones de función o de estructura, generan el resultado anatómico final. Por último, las variaciones de forma entre los individuos analizados se proyectan sobre un espacio de dos o tres dimensiones.



Modelos geométricos
Reconstrucción digital de Mladeč 1, un fósil anatómicamente moderno del Pleistoceno superior europeo datado en unos 30.000 años de antigüedad. Sobre ella se han representado varios modelos geométricos (*líneas y puntos anatómicos*) del cráneo (*izquierda*) y del endocráneo (*derecha*). La comparación entre los modelos de distintos individuos o especies permite determinar sus diferencias morfológicas.

Análisis de la variación morfológica
Comparación entre la geometría parietal de *Homo sapiens* y la de los humanos extintos. Una función de interpolación (*Thin-Plate Spline*, diseñada originalmente para aplicaciones de ingeniería) permite caracterizar la deformación espacial resultante. Las variaciones se representan sobre un plano bidimensional (*retículo verde*).

terminadas áreas. Las dos áreas del lenguaje se muestran proporcionalmente más anchas en los humanos modernos y en los neandertales, algo que quizás apunte a la emergencia de nuevas habilidades cognitivas en estos dos grupos. No obstante, la identificación de tales cambios no resulta tan clara, ya que una misma área cerebral puede hallarse involucrada en varias funciones. El lenguaje, por ejemplo, guarda una estrecha relación con nuestra capacidad para usar las manos. Al respecto, una pregunta abierta es si los simios antropomorfos cuentan con algún equivalente de estas áreas humanas.

A pesar del interés histórico que han suscitado las áreas asociadas al lenguaje, las que más atención están recibiendo durante los últimos son los lóbulos parietales. En el estudio de estas regiones y del sistema frontoparietal se centra otra de las líneas de trabajo de nuestro grupo, ya que, como veremos, su evolución parece guardar una estrecha relación con la del cerebro de *Homo sapiens*.

El cerebro del hombre moderno posee una forma particularmente esférica, debida, sobre todo, a la geometría de sus áreas parietales. Esta diferencia con las especies extintas no obedece a un proceso gradual, sino que resulta exclusiva de nuestra especie. Tampoco puede explicarse a partir del proceso de encefalización, ya que los neandertales poseían un cerebro incluso más grande que el nuestro, que, sin embargo, no exhibía dicha geometría globular.

Esa forma aparece como consecuencia de un proceso morfogenético muy temprano en la vida del individuo, próximo al nacimiento. Se trata de una etapa del desarrollo inexistente en los chimpancés o en los neandertales. A pesar de haber reconocido desde hace tiempo que las áreas parietales humanas poseen componentes diferentes de las que se observan en otros primates, aún no disponemos de comparaciones de tamaño más específicas. Ello se debe a la dificultad de localizar límites comunes y biológicamente homogéneos de estos lóbulos, caracterizados por una gran heterogeneidad morfológica y funcional.

Al respecto, ya existían algunas hipótesis sobre un aumento relativo de las áreas parietales en el género *Australopithecus*, lo que se habría debido a una retrocesión de un surco posterior a estas, el *sulcus lunatus*. También se han hallado indicios de un incremento de las proporciones parietales —lateralmente, sobre todo— en *Homo habilis* (un grupo bastante debatido y que quizás integrase a varias especies, no todas ellas pertenecientes al genero *Homo*). También en los neandertales se observa una ampliación lateral de las regiones parietales inferiores y superiores.

Sin embargo, es en los humanos modernos donde el cambio en las proporciones parietales reviste una magnitud tal como para afectar a la geometría del cerebro en su conjunto. Algunos cráneos fósiles de hace entre 100.000 y 150.000 años, hallados en África Oriental y Oriente Próximo, ya evidencian esta morfología. Sin embargo, otros fósiles africanos algo más antiguos y que probablemente perteneciesen a la línea filética moderna no presentan estos cambios parietales tan evidentes. Ello sugiere que el origen de *Homo sapiens* quizá no se halle vinculado de manera tan estricta al origen de un cerebro anatómicamente moderno.

¿Qué aspectos cognitivos podemos asociar a esas áreas parietales? Las más profundas (aquellas que quizá guarden una mayor relación con el cambio geométrico del cerebro moderno, como el surco intraparietal) se hallan vinculadas a nuestra capacidad de simulación. A partir de la interacción entre la vista y las actividades manuales, estas regiones representan una interfaz entre el mundo externo y el interno. Generan un sistema de coordenadas exterior y otro del individuo, los cuales compo-

nen un «espacio virtual» en el que, entre otras cosas, pueden realizarse «experimentos mentales».

Otras áreas parietales desempeñan también un papel en la integración de la memoria y el lenguaje, así como en las facultades de cálculo. Las áreas parietales superiores y las intraparietales se encuentran conectadas con las zonas frontales, lo que ha dado pie a teorías frontoparietales sobre la evolución de la inteligencia. Las mismas regiones se han asociado a patrones de integración cerebral (esquemas de correlación entre estructuras anatómicas) y puede que se relacionen asimismo con la velocidad mental.

Aunque son numerosos los cambios evolutivos que no se dejan analizar a partir del estudio de la morfología endocraneal, ciertos aspectos morfológicos del endocráneo sí permiten extraer algunas conclusiones fisiológicas. El metabolismo y la termorregulación cerebral, por ejemplo, dependen entre otros factores de la geometría y del tamaño del encéfalo: aparte de los procesos reguladores de carácter fisiológico, también la forma de un órgano desempeña un papel relevante a la hora de caracterizar los patrones de dispersión del calor. El elevado consumo energético de nuestro cerebro constituye una característica muy particular tanto de dicho órgano (es el que más energía consume) como de nuestra especie (tan elevado coste calórico resulta exclusivo de *Homo sapiens*). Si tenemos en cuenta que, además, las neuronas no pueden sufrir cambios en la temperatura, podemos concluir que el estudio de los factores de termorregulación cerebral se antoja muy prometedor.

CIENCIAS PARA EL CEREBRO

El cerebro es el órgano más complejo que conocemos. Es también el más característico de los primates en general y de nuestra especie en particular. Sin embargo, aún desconocemos su biología. Pero, sobre todo, ignoramos los procesos cerebrales a partir de los cuales emerge la mente. Los términos *cognición* e *inteligencia* siguen resultando difíciles de definir, y los intentos por cuantificar y describir sus variaciones se han mostrado tan necesarios y útiles como poco resolutivos.

En el estudio de la evolución del cerebro, solo un enfoque multidisciplinar puede ofrecer hipótesis completas e interesantes. La paleoneurología examina las variaciones de la morfología endocraneal en especímenes fósiles. A su lado, se requieren conocimientos arqueológicos para proporcionar un marco cultural al registro antropológico. Los neuroanatomistas estudian los rasgos que diferencian a unas especies actuales de otras, y la bioquímica y la biología molecular investigan los aspectos fisiológicos y genéticos de los procesos neurales. La neurocirugía y la neurología revisten una importancia fundamental a la hora de anclar todo ese conjunto a la observación clínica. Y, durante los últimos años, también la psicología y psiquiatría han realizado grandes aportaciones a las teorías evolutivas.

La integración de todas esas disciplinas ha generado nuevos campos de investigación, como la arqueología cognitiva. Si bien la mayoría de tales estudios se encuentran aún en sus inicios, puede que los primeros avances que este enfoque multidisciplinar prometedor no tarden en llegar. Mientras tanto, continuaremos investigando para tratar de reconstruir los procesos de evolución cerebral en los homínidos extintos y en nuestra propia especie, pues, en palabras de Santiago Ramón y Cajal: «Todo hombre puede ser, si se lo propone, escultor de su propio cerebro».

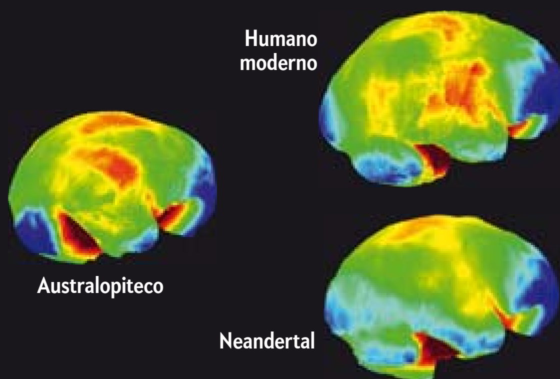
DATOS FISIOLÓGICOS

Termorregulación cerebral

Nuestro cerebro constituye el órgano que más energía consume. Ese elevado gasto calórico, fundamental para su funcionamiento, resulta exclusivo de *Homo sapiens*, por lo que representa un parámetro fisiológico cuya evolución reviste un interés especial. Los moldes endocraneales pueden aportar información sobre factores fisiológicos en las especies extintas, como los flujos sanguíneos o la termorregulación cerebral.



Irrigación vascular
Las técnicas de angiotomografía permiten analizar la irrigación vascular del cerebro en individuos vivos. Estas imágenes muestran una reconstrucción digital de la distribución de los senos venosos meníngeos con relación a la anatomía del cráneo (*izquierda*) y del cerebro (*derecha*).



Termorregulación
Los modelos de dispersión del calor permiten cuantificar la distribución local de temperaturas en función de la forma cerebral. Aquí se reproducen las áreas cerebrales más frías (*azul*) y las más calientes (*rojo*) sobre los moldes endocraneales de tres homínidos.

PARA SABER MÁS

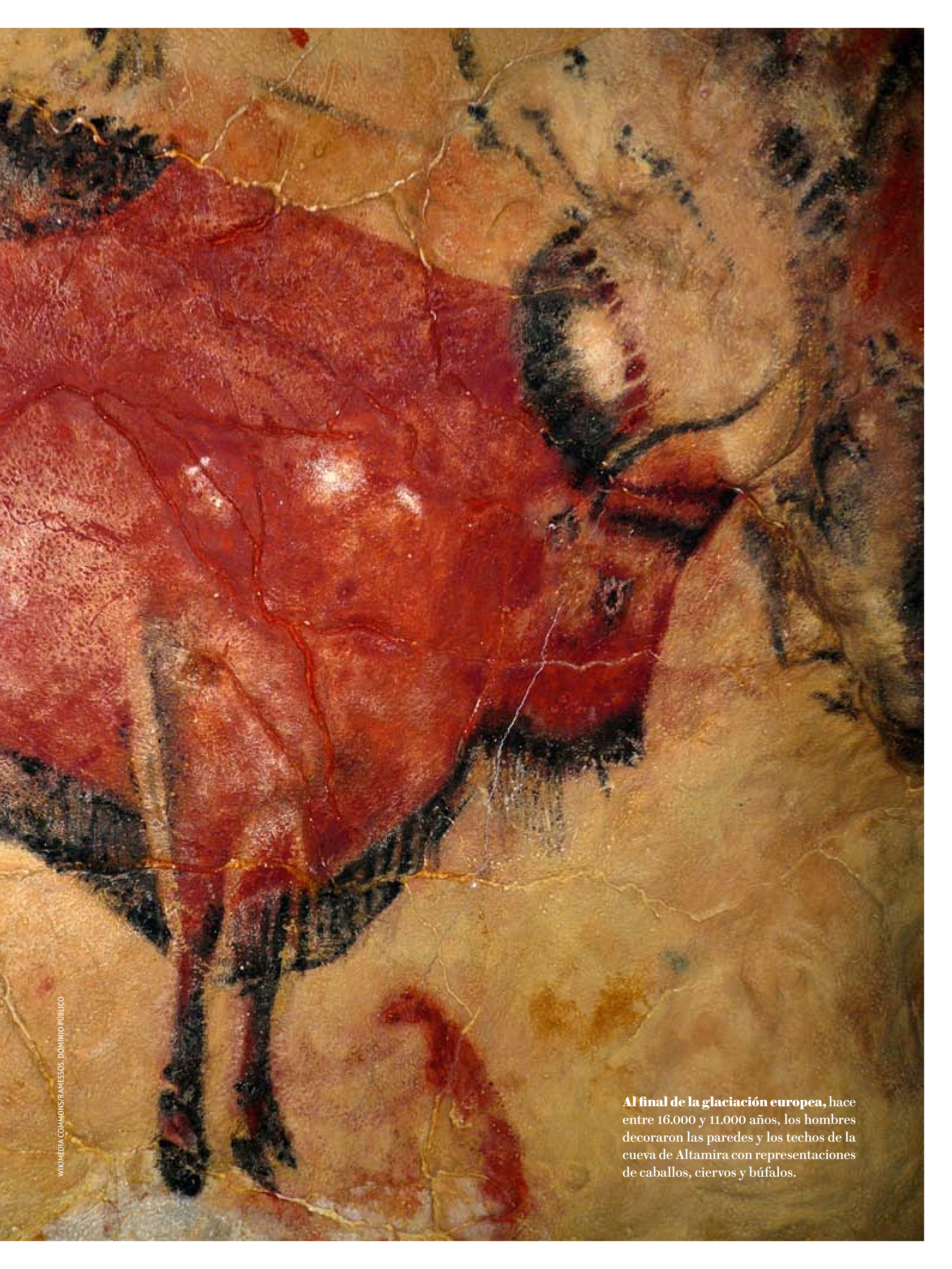
The human fossil record. Vol. 3: Brain endocasts. The paleoneurological evidence. Ralph Holloway, Douglas Broadfield y Michael S. Yuan. Wiley-Liss; Nueva York, 2004.
Geometric morphometrics and paleoneurology: Brain shape evolution in the genus *Homo*. Emiliano Bruner en *Journal of Human Evolution*, vol. 47 págs. 279-303, 2004.
Cranial shape and size variation in human evolution: Structural and functional perspectives. Emiliano Bruner en *Child's Nervous System*, vol. 23, págs. 1357-1365, 2007.
The rise of *Homo sapiens*: The evolution of modern thinking. Frederick L. Coolidge y Thomas Wynn. Wiley-Blackwell, 2009.
The human brain evolving. Dirigido por Douglas Broadfield, Michael Yuan, Kathy Schick y Nicholas Toth. Stone Age Institute Publication Series, vol. 4. Stone Age Institute Press, diciembre de 2010.

DESARROLLO COGNITIVO

Polifacético, flexible e ingenioso

De entre todas las especies que han aparecido a lo largo de la evolución del género *Homo*, solo *Homo sapiens* ha conseguido perdurar hasta nuestros días. ¿A qué se debe nuestro éxito?

Miriam Noël Haidle



Al final de la glaciación europea, hace entre 16.000 y 11.000 años, los hombres decoraron las paredes y los techos de la cueva de Altamira con representaciones de caballos, ciervos y búfalos.

Miriam Noël Naidle es coordinadora del proyecto de investigación «El papel de la cultura en las primeras expansiones humanas» de la Academia Científica de Heidelberg (Alemania). Enseña e investiga en el campo de la arqueología cognitiva.



Los humanos nos adaptamos al entorno de manera extraordinaria. Poblamos todos los continentes de la Tierra, somos capaces de sobrevivir en cualquier zona climática y hemos explorado incluso el espacio. Nuestras construcciones abarcan desde simples chozas hasta gigantescos rascacielos. Igualmente diversa es nuestra dieta, que, gracias a la cocción, la fermentación o la molienda, incluye alimentos que de otro modo digeriríamos con dificultad.

El hombre es también un ser social. Nuestras comunidades abarcan desde estructuras de convivencia duraderas, como la familia, hasta redes laxas que incluyen millones de miembros. En estos grupos intercambiamos sin cesar información de todo tipo y grado de complejidad; ya sea de forma directa, a través de palabras o gestos, o indirecta, con textos y dibujos. El ser humano se caracteriza, ante todo, por usar herramientas. Con una piedra clavamos postes en el suelo. Mediante otras máquinas fabricamos piezas de metal y plástico con las que ensamblamos después automóviles y ordenadores.

Al preguntarnos por las características que otorgan a *Homo sapiens* su particular puesto en el reino animal, destaca la enorme flexibilidad de la que hace gala nuestra especie. Esta se debe, sobre todo, a tres factores: una constitución física que nos capacita para llevar a cabo actividades de toda clase, un elevado grado de desarrollo de las capacidades cognitivas y, por último, una notoria necesidad de crear cultura.

El género *Homo* existe desde hace unos dos millones de años. En comparación con todo lo anterior, sus primeros representantes no nos causarían demasiada impresión. Al igual que sus antepasados, los australopitecinos, caminaban erectos. Las poderosas mandíbulas de sus ancestros se habían reducido, lo que les confería un aspecto menos amenazador. Su constitución corporal se adecuaba más a la resistencia que a la fuerza física. Y sus manos, en unos brazos cada vez más cortos, contaban con un pulgar que permitía un mecanismo de agarre fuerte y preciso.

Poco a poco, el cerebro aumentó de tamaño (de poco más de 500 centímetros cúbicos en los primeros representantes del género *Homo*, alcanzaría una media de 1350 centímetros cúbicos en el hombre moderno). Esa transformación requirió incrementar de manera notable el consumo de energía. Al mismo tiempo, sin embargo, se redujo la longitud del aparato digestivo, por lo que nuestros antepasados se hicieron cada vez más dependientes de una dieta que debía ser tan energética como de digestión fácil. Con este telón de fondo, podríamos pensar que los primeros representantes del género *Homo* no gozaban de las condiciones más prometedoras para garantizar el éxito en la árida sabana africana. No obstante, fueron ellos los primeros que, hace dos millones de años, abandonaron África.

Aunque, a primera vista, algunos de los cambios físicos que ocurrieron durante la evolución no impresionen demasiado, muchos de ellos fueron los responsables del fascinante aumento que experimentaron nuestras capacidades cognitivas. Esas transformaciones abrieron todo un abanico de posibilidades en la percepción sensorial, así como una diversificación en el comportamiento social desconocida hasta entonces. Con ello, ciertas zonas de un cerebro cada vez más voluminoso se especializaron en la concatenación de procesos mentales, en la evaluación emocional del entorno o en la elaboración y desarrollo del lenguaje. Sin embargo, los cráneos fósiles no permiten reconstruir sino de forma vaga la evolución de la estructura cerebral [*véase* «La evolución del cerebro de los homínidos», por Emiliano Bruner, *en este mismo número*], por lo que, hoy por hoy, aún desconocemos si la remodelación del cerebro trajo consigo de inmediato un cambio de su función.

Los primates suelen tener menos descendencia que otros mamíferos de tamaño similar. Sus períodos de gestación y lactancia son también más largos. A lo largo de la evolución humana, la infancia (el período en que las crías dependen de la protección de los padres) y la adolescencia (una época de gran independencia) fueron alargándose de manera progresiva. Estas etapas se caracterizan por la facilidad con la que los jóvenes adquieren experiencia y aprenden formas de comporta-



Hace 25.000 años, los antiguos talladores debieron de confeccionar puntas en forma de hoja de un modo muy parecido al empleado por este arqueólogo, que trabaja un trozo de pedernal con un mazo de cornamenta. Estos martillos permitían controlar mejor la fuerza del golpe gracias al material blando.

CORTESÍA DE WULF HEIN

miento que no se encuentran controladas por los genes. Un rasgo particular del ser humano consiste en su facultad para adquirir habilidades y conocimientos sin necesidad de experimentarlos por sí mismo: puede aprender por medio de la instrucción y la imitación de la conducta ajena, aunque en un principio no entienda su utilidad. Además, la capacidad de formación se prolonga durante toda la vida. Otros simios antropomorfos continúan siendo curiosos y prestos a aprender aún en la etapa adulta, pero los humanos lo somos hasta un punto extraordinario.

Nuestra disposición para establecer relaciones sociales y culturales se debe, por tanto, a varios motivos: no dependemos de una única dieta, gozamos de una gran versatilidad manual, y nuestra capacidad de comunicarnos con palabras y gestos nos permite adecuarnos a las circunstancias más diversas. Estas características, junto a la singular evolución de nuestro cerebro, contribuyen a una inigualable flexibilidad en el comportamiento diario, la cual se halla en la base de la diversificación cultural. Por «cultura» entendemos aquí la competencia para transmitir conocimientos de una generación a otra, con independencia del parentesco biológico.

AFRONTAR PROBLEMAS

Las características tan especiales del desarrollo cultural y la flexibilidad del género *Homo* se hacen patentes en su manera de manipular herramientas. El empleo de utensilios no solo brindó nuevas posibilidades, sino que planteó también todo un desafío intelectual.

El empleo de herramientas no es, sin embargo, exclusivo del hombre. Si un chimpancé desea comer una nuez, se apartará durante un tiempo de su objetivo para buscar una piedra con la que cascar el fruto. La capacidad para resolver problemas de manera indirecta rara vez forma parte del comportamiento instintivo codificado en los genes; como ocurre con algunas avispas de arena, que emplean pequeñas piedras para cubrir los nidos de sus crías. Por lo general, los animales toman decisiones cognitivas: algunos delfines, cuando buscan alimento cerca del fondo marino, se cubren el morro con esponjas para proteger esa zona del cuerpo, muy sensible. Son también numerosos los animales que emplean herramientas para buscar comida. Y los simios antropomorfos van más allá: utilizan piedras o ramas con otros fines, como intimidar, defenderse, desplazarse, limpiarse o jugar.

En el año 2007 se documentó un comportamiento asombroso en nuestros parientes más cercanos, los chimpancés: durante la persecución de otros primates, se observó cómo empleaban palos a modo de lanzas; en otras ocasiones, se les vio usar ramas para buscar tubérculos y raíces. Hasta entonces, se consideraba que tales comportamientos eran exclusivos de los humanos.

Sin embargo, hay una facultad mental fundamental que, hasta ahora, no ha sido documentada en ningún otro animal: el

Continúa en la página 85

EN SÍNTESIS

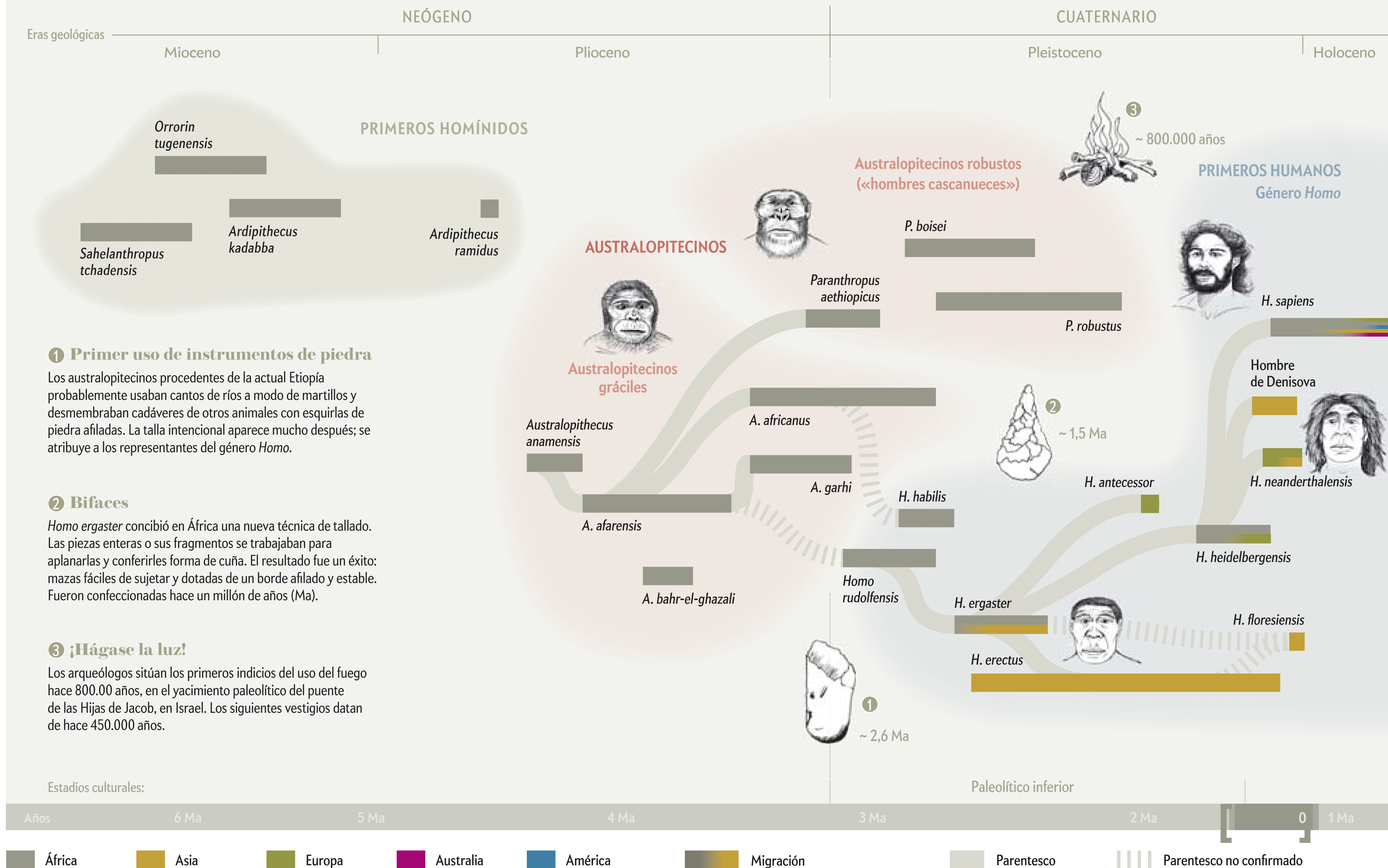
El género *Homo* desarrolló una enorme flexibilidad de comportamiento y unas facultades cognitivas únicas.

Un salto clave se produjo cuando el hombre adquirió la notable habilidad de utilizar una herramienta para fabricar otra.

La ornamenta y las pinturas rupestres atestiguan la existencia de una concepción compleja del mundo.



Cerca de Schöningen, los arqueólogos recuperaron en 1995 ocho lanzas de madera de hasta 2,5 metros de longitud entre huesos de animales. Unos 400.000 años antes, un grupo de cazadores había abatido allí una manada de caballos salvajes.



Una historia de varios millones de años
NEÓGENO
CUATERNARIO
Eras geológicas
Mioceno
Plioceno
Pleistoceno
Holoceno
PRIMEROS HOMÍNIDOS
Orrorin tugenensis
Sahelanthropus tchadensis
Ardipithecus kadabba
Ardipithecus ramidus
AUSTRALOPITECINOS
Australopitecinos gráciles
Australopithecus anamensis
A. afarensis
A. bahr-el-ghazali
A. africanus
A. garhi
Paranthropus aethiopicus
Australopitecinos robustos («hombres cascanueces»)
P. boisei
P. robustus
PRIMEROS HUMANOS
Género Homo
H. sapiens
Hombre de Denisova
H. neanderthalensis
H. antecessor
H. heidelbergensis
H. habilis
Homo rudolfensis
H. ergaster
H. erectus
H. floresiensis
~ 800.000 años
~ 1,5 Ma
~ 2,6 Ma
1 Primer uso de instrumentos de piedra
Los australopitecinos procedentes de la actual Etiopía probablemente usaban cantos de ríos a modo de martillos y desmembraban cadáveres de otros animales con esquirlas de piedra afiladas. La talla intencional aparece mucho después; se atribuye a los representantes del género Homo.
2 Bifaces
Homo ergaster concibió en África una nueva técnica de tallado. Las piezas enteras o sus fragmentos se trabajaban para aplanarlas y conferirles forma de cuña. El resultado fue un éxito: mazas fáciles de sujetar y dotadas de un borde afilado y estable. Fueron confeccionadas hace un millón de años (Ma).
3 ¡Hágase la luz!
Los arqueólogos sitúan los primeros indicios del uso del fuego hace 800.00 años, en el yacimiento paleolítico del puente de las Hijas de Jacob, en Israel. Los siguientes vestigios datan de hace 450.000 años.
Estadios culturales:
Paleolítico inferior
Años
6 Ma
5 Ma
4 Ma
3 Ma
2 Ma
0
1 Ma
África
Asia
Europa
Australia
América
Migración
Parentesco
Parentesco no confirmado

Años	300.000	200.000	100.000	0

Estadios culturales: Paleolítico inferior · Paleolítico medio · Paleolítico superior

❹ Lanzas de madera

En esta época, a lo más tardar, nuestros ancestros eran ya maestros en el trabajo de la madera. Los cazadores que emplearon las lanzas de Schöningen habían abatido con ellas una manada de caballos salvajes.

❻ Pegamento

Los neandertales extraían una brea de la corteza del abedul con la que unían puntas de piedra y mangos de madera.

❽ Tradiciones funerarias

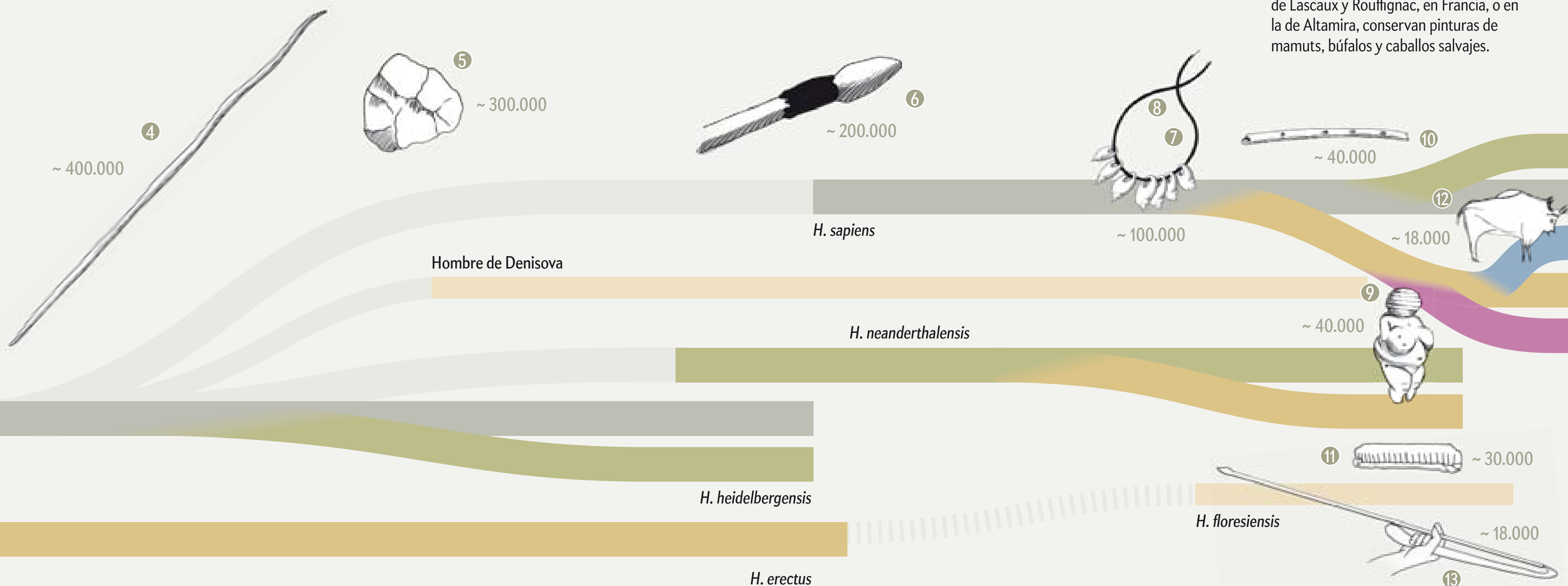
El hombre moderno, y quizá también el de neandertal, enterraba a sus muertos en grutas. Las ofrendas adyacentes de ocre, los instrumentos de madera y la carne animal demuestran su creencia en una existencia más allá de la muerte.

❿ Primeras melodías

En las cuevas de Hohle Fels, en la Jura de Suabia, se han hallado los instrumentos musicales más antiguos de la historia de la humanidad. Las preocupaciones de *Homo sapiens* ya trascendían la mera supervivencia y comenzaba a desarrollar su faceta cultural.

⓬ Arte

En esta época se confeccionaron armas y útiles profusamente decorados con figuras de animales y mujeres, así como otros objetos artísticos y ornamentales. La materia prima se obtenía de zonas que podían distar hasta 500 kilómetros entre sí. Las cuevas de Lascaux y Rouffignac, en Francia, o en la de Altamira, conservan pinturas de mamuts, búfalos y caballos salvajes.



❺ El método Levallois

Este método de lascado supuso una innovación más en la técnica lítica. Un piedra redondeada se tallaba desde todos los lados hasta que, al final, con un golpe controlado podía separarse un instrumento afilado como un cuchillo.

❼ Bisutería

Por primera vez, se adornaban utensilios de uso diario con motivos lineales o cruzados. En Sudáfrica, Marruecos e Israel se han hallado caracolas marinas agujereadas que se empleaban a modo de abalorios para collares.

❾ Arte pictórico

Homo sapiens llegó a Europa en el Auriñaciense, donde se empleó como escultor y pintor. Aparecieron las primeras pinturas rupestres y los figurines de marfil. Después, en el Gravetiense, se popularizaron las exuberantes venus. Estas representaciones permiten atisbar un mundo imaginario y complejo.

⓫ Nuevas técnicas de talla

Durante el Gravetiense, los talladores manufacturaban pequeñas hojas de pedernal afiladas por un solo lado y que, unidas con brea a un mango, podían utilizarse para fines diversos. Al mismo tiempo aumentó el uso de otros materiales, como la cornamenta de reno, muy flexible.

⓭ Armas

Los hombres consiguieron doblar el alcance de sus armas arrojadizas con el átlatl. El mango de la lanza se colocaba en un gancho de cornamenta emplazado al final de un palo de madera. La combinación aumentaba el lanzamiento efectuado por el cazador gracias al efecto de palanca.

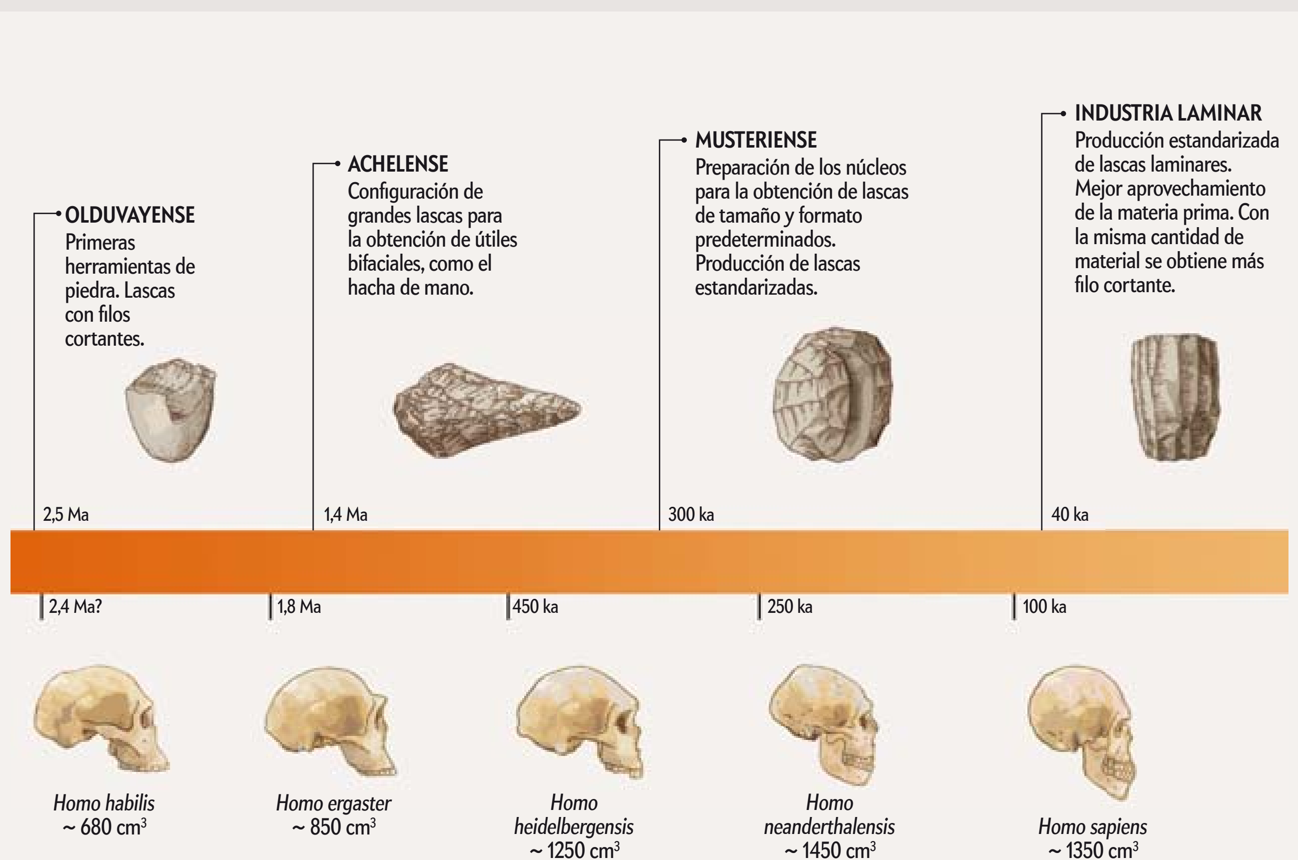
Talla lítica y desarrollo cognitivo

Aunque no existen pruebas concluyentes sobre el papel que desempeñó la industria lítica en el desarrollo cerebral, una nueva línea de investigación podría zanjar la polémica

NÚRIA GERIBÀS ARMENGOL

¿Qué nos hace humanos? Cuando nos planteamos esta pregunta, surge una respuesta casi inmediata: la inteligencia. Si bien este atributo no explica por sí solo la enorme complejidad de nuestra especie, nos diferencia por completo del resto de los miembros del reino animal. Sin embargo, cuando intentamos entender cómo y por qué se produjo un salto cognitivo de semejante calibre en nuestro linaje, nos enfrentamos a un obstáculo de primer orden: el cerebro no fosiliza.

¿Cómo podemos descifrar entonces nuestra evolución cognitiva? Por fortuna, existen otros indicios que nos informan de manera indirecta sobre el grado de desarrollo cerebral de nuestros ancestros. En primer lugar, contamos con los fósiles de sus cráneos. Su volumen refleja la capacidad cerebral, al tiempo que sus paredes internas nos dan algunas pistas sobre la evolución de ciertas áreas del cerebro [*véase* «La evolución cerebral de los homínidos», por Emiliano Bruner, *en este mismo número*]. Por otro lado, la primatología comparada se encarga de estudiar las capacidades cognitivas de los primates no humanos, lo que nos permite establecer un punto de partida teórico sobre el desarrollo de nuestro cerebro. Por último, disponemos de una tercera prueba: el registro arqueológico, el cual nos informa sobre el comportamiento de nuestros ancestros.



Evolución paralela

El esquema muestra la evolución paralela de la tecnología lítica y las capacidades cognitivas de nuestros ancestros según el registro arqueológico. Las fechas indican el momento de aparición de cada tipo de industria, así como de cada especie de homínido (*Ma* denota millones de años; *ka*, miles de años). La aparición de una nueva industria lítica no implica la desaparición de la anterior. Por ejemplo, se han hallado útiles olduvayenses que datan de la misma época que algunas industrias laminares.

En cuanto a los homínidos, el esquema solo muestra la especie contemporánea de cada tipo de tecnología lítica, sin connotaciones genealógicas de ningún tipo. La cifra bajo el nombre de cada especie indica la capacidad craneana media de cada una, en centímetros cúbicos. *Homo neanderthalensis* presentaba una capacidad mayor que los humanos modernos debido a su mayor tamaño corporal. *Homo habilis* fue el primer fabricante conocido de útiles de piedra y el primer representante de nuestro género. El interrogante en su cronología se debe a que los restos fósiles atribuibles al género *Homo* se documentan a partir de los 2,4 millones de años, pero estos no pueden asignarse de manera inequívoca a *Homo habilis* sino hasta hace unos 2 millones de años.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN N. GERIBÀS

Cualquier tipo de conducta es producto de unas facultades cognitivas determinadas. Así, los restos arqueológicos nos indican qué capacidades cognitivas mínimas hubieron de poseer nuestros antepasados para poder llevar a cabo un tipo u otro de actividad. En este contexto, las herramientas de piedra constituyen una fuente de información fundamental por varias razones. Por un lado, nos proporcionan la prueba más antigua de la que disponemos sobre cualquier clase de comportamiento humano. Ello nos permite remontarnos en el estudio del desarrollo de la mente hasta hace 2,5 millones de años, fecha de la que datan los primeros útiles de piedra documentados. Gracias a su carácter imperecedero, dichas herramientas constituyen la prueba más abundante sobre cualquier clase de conducta.

Además, la industria lítica se considera completamente vinculada a nuestras habilidades cognitivas. Ninguna otra especie animal fabrica herramientas (con la ayuda de otra herramienta), por lo que la aparición de útiles se atribuye a una transición cognitiva de primer orden. Los útiles de piedra aparecen como producto de una acción consciente: la talla. De hecho, se ha documentado un desarrollo paralelo entre las capacidades cognitivas de nuestros ancestros y su tecnología lítica.

¿Causa o consecuencia?

A lo largo de los años, se han propuesto hipótesis muy diversas. Desde los tiempos de Darwin, la idea más extendida afirma que las herramientas de piedra contribuyen al desarrollo cerebral por medio de un proceso constante de retroalimentación: la producción de útiles estimula el desarrollo del cerebro y, a su vez, un cerebro más desarrollado puede elaborar herramientas más complejas. Además, la aparición de útiles líticos permitió el acceso a nutrientes de alto valor proteico, como la carne, imprescindibles para mantener un cerebro cada vez mayor y más complejo.

Sin embargo, hay quienes piensan que, más allá del acceso a la carne, las herramientas de piedra no desempeñaron ningún papel destacado en el desarrollo cerebral. Estos autores defienden que nuestra inteligencia se debe a otras esferas de la vida —más complejas, a su entender, que la tecnología lítica—, como las relaciones sociales.

Sea como fuere, lo cierto es que el estado actual de las investigaciones no nos permite deducir el papel que desempeñó la tecnología lítica en nuestro desarrollo cognitivo sin entrar en el terreno de la especulación. El registro arqueológico no basta, puesto que se limita a apuntar qué capacidades cognitivas mínimas debía poseer un homínido para poderlas fabricar. Sin embargo, la última década ha visto nacer una línea de estudio que quizá ponga fin a las cábalas y ofrezca, por vez primera, datos empíricos sobre la presión evolutiva de la tecnología lítica.

Dicha línea de investigación, liderada por el profesor Dietrich Stout, de la Universidad Emory, intenta determinar qué áreas del cerebro participan en los procesos de talla. Para ello, recurre a la tomografía de emisión de positrones, una técnica muy empleada en neurología y en el diagnóstico de enfermedades cerebrales. Se trata, por supuesto, de un enfoque actualista, ya que parte de la premisa de que la talla lítica exige los mismos requisitos mentales a un humano moderno que a un homínido de hace 2,5 millones de años. No obstante, si logramos identificar qué áreas del cerebro de un humano moderno se activan durante la talla, quizá podremos saber cuál era el grado mínimo de desarrollo cerebral de los homínidos que fabricaron cada tipo de herramienta. Asimismo, debería ser posible averiguar qué zonas cerebrales se seleccionaron a lo largo de la evolución como consecuencia de la presión ejercida por la talla.

En cualquier caso, nos encontraremos más cerca de entender qué función ejerció la tecnología lítica en el desarrollo de nuestro cerebro. Sin duda, una línea de investigación prometedora.

Núria Geribàs Armengol trabaja en el Instituto de Paleoecología Humana y Evolución Social (Universidad Rovira i Virgili, Tarragona)

Viene de la página 81

uso secundario de herramientas. Podemos decir que la historia cultural del hombre empezó con un modo revolucionario de solucionar problemas: con simples guijarros, nuestros ancestros eran capaces de obtener, a partir de una matriz de piedra, cantos afilados con los que desmembrar presas. Los ejemplos más antiguos de utensilios líticos de este estilo, hallados en el este de África, se remontan a hace 2,6 millones de años. Constituyen la primera prueba del uso de una herramienta para manufacturar otra.

Con toda probabilidad, las primeras herramientas así fabricadas fueron elaboradas con algún material perecedero, por lo que no habrían llegado hasta nuestros días. Una indicación en este sentido nos la proporcionan los chimpancés, quienes emplean ramas para extraer termitas del suelo. Los objetos de piedra no aportarían, por tanto, más que una pequeña muestra de un repertorio de prácticas mucho más rico. Con todo, estos pequeños fragmentos nos informan sobre algunos aspectos clave de la fascinante diversidad del comportamiento humano.

Hace unos dos millones de años, nuestros antepasados comenzaron a invertir más tiempo en la fabricación de herramientas. No solo recolectaban el material en el lugar en el que pretendían utilizarlo, sino también en zonas situadas a kilómetros de distancia. Con independencia de si transportaban el material consigo o si lo trabajaban en la zona de recogida, la producción de utensilios obedecía a una planificación previa. Y, aunque huir de los depredadores o buscar agua se convirtiesen, en ocasiones, en objetivos de mayor importancia, nunca dejaron de fabricar herramientas.

Hace 1,9 millones de años, nuestros antepasados abandonaron África y se adentraron en zonas más frías, hasta llegar al este de Asia. Por aquel entonces aún no utilizaban el fuego, pero probablemente observaban con tranquilidad los pequeños incendios (un comportamiento que algunos etólogos han observado hace poco entre los chimpancés). Quizá fue en estas circunstancias cuando se aficionaron a la carne a la brasa, tras alimentarse de animales muertos a causa del fuego.

JUGANDO CON FUEGO

Pero habría de transcurrir largo tiempo antes de que el hombre lograse manejar el fuego. Algunos investigadores sitúan este hito hace unos 800.000 años. Como prueba, contamos con semillas, trozos de madera y pedernal quemados hallados en las inmediaciones del puente de las Hijas de Jacob, un yacimiento paleolítico israelí. Seguramente pasaron algunos cientos de miles de años más hasta que los hombres aprendieron a encender el fuego y obtener chispas, llamas y ascuas de manera intencionada, algo que se cree que consiguieron hace unos 200.000 años.

Puede que hoy nos parezca natural la capacidad para transmitir a la generación siguiente nuestros logros técnicos e intelectuales, así como la facultad para desarrollarlos y combinar las ideas pasadas con las propias. Pero, para llegar hasta aquí, nuestros antepasados tuvieron que aprender a percibir al prójimo como individuos capaces de actuar de manera consciente,

así como a saber ver en las técnicas de trabajo un principio independiente, más allá de sus aplicaciones concretas. Una piedra no solo servía para cascar nueces u obtener utensilios cortantes, también podía usarse a modo de martillo. Por ello, resultaba tan útil que siempre había que disponer de una. Una «caja de herramientas» repleta de estos objetos permitía hacer frente a tareas laboriosas y complejas. La adquisición de estas nuevas capacidades cognitivas queda demostrada con el ejemplo de las lanzas de madera de Schöningen, de una antigüedad estimada entre 400.000 y 300.000 años. Constituían armas de caza versátiles, cuya confección debió requerir varios días.

Una herramienta sin ninguna aplicación evidente animaba a probarla en otros contextos. Así, se construyeron aparatos compuestos, como útiles o armas que se montaban a partir de piezas diferentes. Los primeros en emplear esta técnica fueron los neandertales. Hace unos 200.000 años, con brea de abedul, aprendieron a afianzar puntas de piedra en lanzas de madera. La genialidad del invento residía en que la utilidad de la punta y la de la lanza aumentaban de manera espectacular con la nueva combinación.

A medida que nuestros antepasados iban descubriendo nuevas aplicaciones para sus herramientas, nació en ellos la sensibilidad estética. Puede que todavía no se tratase de arte, pero en esta fase del desarrollo aumentó con rapidez la preferencia por los utensilios de piedra simétricos y de gran tamaño, por los objetos insólitos, como los fósiles, o por los colores llamativos. Ello condujo a nuevas formas de expresión artística, desde la decoración de herramientas y la confección de adornos personales a la creación de mundos abstractos por medio de pinturas y símbolos. Aunque el arte del Paleolítico no pareciese desempeñar ninguna función, constituía un nuevo medio para la transmisión de tradiciones y mitos, así como indicaciones de estatus social que complementaban al lenguaje hablado.

Los expertos no coinciden por completo a la hora de determinar la manera y momento en que emergió el lenguaje. La forma de los cráneos fósiles, así como la de los huesos de la zona faríngea y del oído, lleva a suponer que los hombres de hace entre 600.000 y 400.000 años ya podían emitir sonidos similares a palabras y, posiblemente, también escucharlas. Pero el desarrollo del lenguaje requiere, además, la capacidad de articular dichos sonidos en sílabas o palabras completas, todo ello en combinaciones siempre nuevas. Si atendiésemos al principio de la «caja de herramientas» mencionado más arriba, podríamos concluir que el ser humano habría adquirido la capacidad del lenguaje hace, como mucho, 400.000 años. Sin embargo, si aquellas habilidades se transmitieron por medio del habla constituye una cuestión abierta al debate. En todo caso, la sobresaliente capacidad de intercambiar información, ya fuese por medio de palabras o de imágenes, permitió continuar acumulando conocimiento.

Gracias a su constitución anatómica y a la flexibilidad que esta proporcionaba, *Homo sapiens* amplió las posibilidades de sus manifestaciones culturales hasta una dimensión inesperada. Hoy, algunos humanos todavía viven en condiciones similares a las que imperaban en la Edad de Piedra; otros dirigen multinacionales y vuelan alrededor del mundo. Los hombres pueden alimentarse de forma autosuficiente o hacerlo con la ayuda de miles de empleados de la industria alimentaria, del embalaje y de la logística. La variedad de comportamientos que el hombre moderno es capaz de tolerar y su flexibilidad para adaptarse al entorno no dependen de su capacidad para crear cultura. Esta es idéntica en todos nosotros. Como especie, los humanos hacemos gala de una flexibilidad extraordinaria, por más que como individuos podamos, a veces, anclarnos en las tradiciones y desechar toda novedad... algo que, sin duda, también forma parte de la adaptabilidad que caracteriza a nuestra especie.



Nuestros antepasados comenzaron a portar adornos hace unos 120.000 años. Agujereaban caracolas y dientes de lobos u osos, y los llevaban pegados al cuerpo o cosidos a la ropa. La ornamenta debía procurar protección y denotar el estatus social del individuo.

UNA TÉCNICA REVOLUCIONARIA

La invención del pegamento



Los representantes europeos del género *Homo* fueron grandes innovadores. Hace 200.000 años ya fabricaban pegamento a partir de la corteza del abedul: al calentar en un hoyo (en una atmósfera pobre en oxígeno) fragmentos de corteza, se producía un tipo de brea. Esta se endurecía al enfriarse, pero podía volver a calentarse y ablandarse de nuevo.

Se han descubierto restos de brea de abedul en varios yacimientos paleolíticos de Italia, Francia y Alemania. Otros pegamentos de la misma época han sido hallados en Siria y, sobre todo, en Sudáfrica. En estos casos, se trata de brea natural (betún) o de pegamentos compuestos a partir de una mezcla de grasa animal, resina vegetal y almagre.

En Hornstaad, cerca del lago de Constanza, se ha recuperado goma de mascar elaborada a partir de brea de abedul y datada en fecha mucho más reciente, entre los años 4400 a.C y 3500 a.C. (Neolítico tardío). Se desconoce si esta goma fue elaborada para solaz o si se masticaba a fin de ablandarla. También Ötzi, el individuo cuya momia fue hallada en los Alpes en 1991, utilizó este pegamento hacia el año 3100 a.C.: las puntas de dos de sus flechas se encontraban pegadas con brea de abedul (*imagen*).

PARA SABER MÁS

Handbook of paleoanthropology. W. Henke y I. Tattersall (eds.). Springer-Verlag. Heidelberg, 2007.

Working-memory capacity and the evolution of modern cognitive potential: Implications from animal and early human tool use. M. N. Haidle en *Current Anthropology*, vol. 51, n.º S1, junio de 2010.

por Marc Boada

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Energía, casi, gratuita

Tenemos a nuestro alcance numerosos materiales idóneos para captar cantidades ingentes de energía. El reto consiste en conseguirlo a un coste mínimo

La experimentación científica y la práctica técnica nos conducen a veces a lugares inhóspitos y poco acogedores. Ello se acentúa sobre todo en invierno, cuando el frío arrecia y nos encontramos en un gélido taller. Así estaba yo a principios de este invierno, experimentando a solo 12 ºC mientras en el exterior lucía radiante nuestra estrella, el Sol. Lo de *radiante* no es solo una metáfora. Se trata de un término científico. El Sol constituye una potentísima fuente de radiación en una amplísima región del espectro electromagnético. Las radiaciones que más contribuyen a caldear el ambiente son las ultravioletas, las visibles y, en especial, las infrarrojas.

Miremos al Sol y percibamos su calor, un flujo ingente de energía radiante que podemos aprovechar sin demasiadas dificultades para ganar confort y reducir el consumo y las emisiones. Esta afirmación se hace más cierta cuando observamos nuestro universo tecnológico más cercano. Nos hallamos rodeados de materiales sofisticadísimos, que, combinados con pragmatismo, sentido común y soporte científico, permiten captar cantidades notables de energía. Para ello basta con poco más de lo que puede encontrarse en un laboratorio escolar: dos termómetros idénticos, a ser posible con una lectura de décimas de grado, un sensor de tamaño reducido y una inercia térmica mínima. Con ello ya podemos abordar un reto ambicioso: captar un máximo de calor solar con un estipendio mínimo y un no menos reducido esfuerzo técnico.

¿Qué cantidad de energía nos llega del Sol? ¿Cuánta es la energía radiante disponible? Dado que este parámetro fluctúa con las estaciones y el estado atmosférico, la cuestión es: ¿Cuánta energía podemos captar en la práctica? Midamos primero el calor que podemos acumular por unidad de superficie. Para ello utilicé un gran disco de cobre, de 16 kilos. Lo pinté de color negro mate y lo aislé con espuma de poliuretano, dejando tan solo expuesta una cara lisa, perpendicular al sol. Con un termómetro con dos sondas medí los incrementos de temperatura de la cara anterior y posterior. Supuse que la temperatura media del disco era la comprendida entre las dos lecturas.

En una primera aproximación, la temperatura del disco depende solo de la radiación que absorbe y el calor específico del material, ya que las diferencias de temperatura entre la cara iluminada y la posterior solo vienen condicionadas por la conductividad térmica del material —motivo por el cual escogí el cobre—. Pero si acercamos la mano, comprobaremos que el disco emite calor, es decir, irradia a su vez parte de la radiación captada. La absorción y la re-radiación del material serán, pues, factores críticos que deberemos considerar en este proyecto. Pero eso no es todo. El disco pierde calor también por conducción: por contacto con el aislante y con la atmósfera. Para minimizar esta pérdida, cubrí el disco con una tapa de plástico transparente.

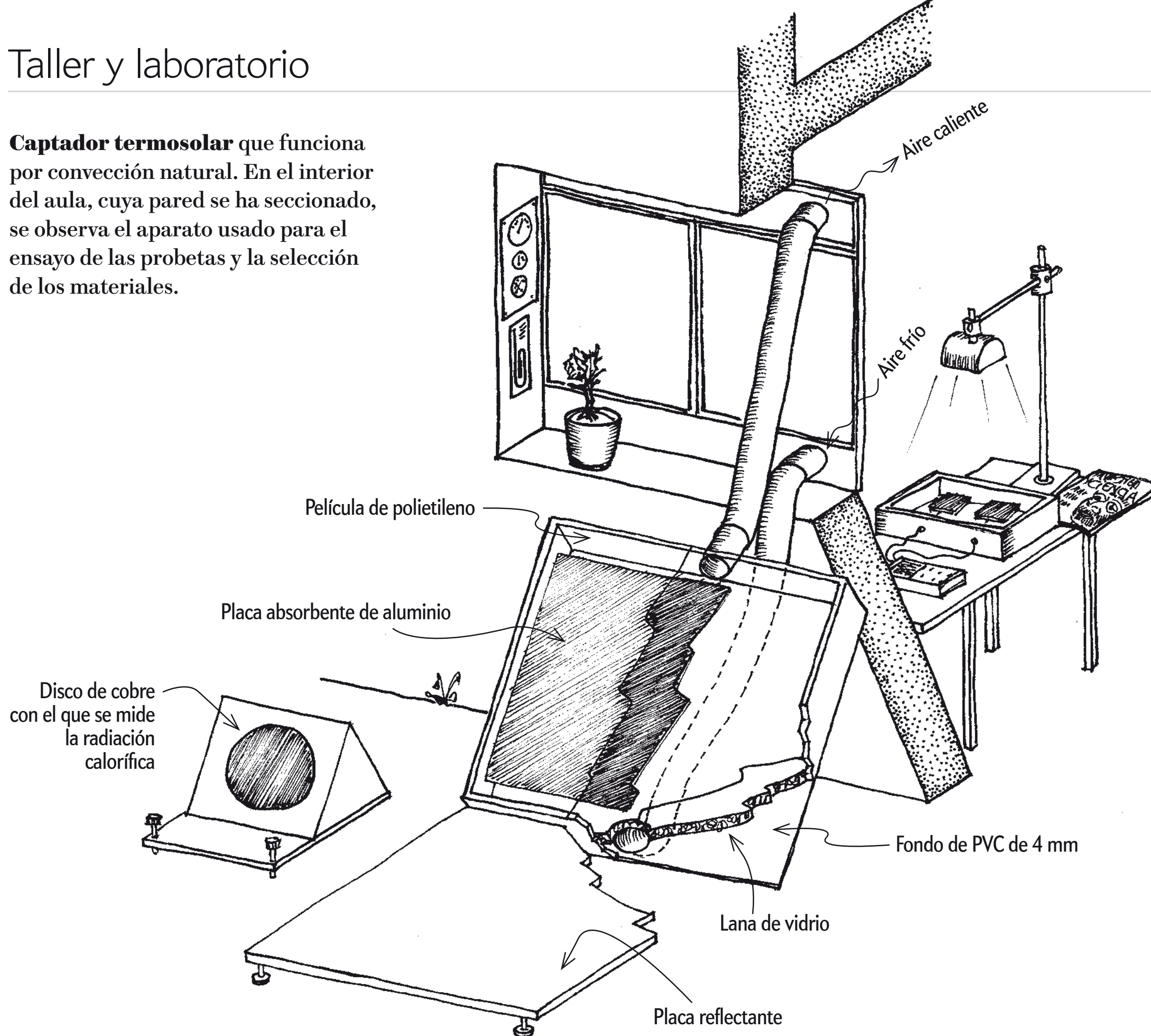
Con los datos obtenidos tracé una gráfica: la temperatura partía de 12 ºC y aumentaba de forma gradual hasta superar los 40 ºC, momento en que desapareció el tenue sol invernal.

Cuando un cuerpo absorbe energía del sol almacena calor o, mejor dicho, energía térmica (que medimos en julios). Ello lo hace a lo largo de un tiempo, por lo que resulta más útil conocer la energía por unidad de tiempo, o potencia, que se mide en vatios (julios por segundo). Y en el caso de la irradiación solar, la cantidad más conveniente es la potencia por unidad de superficie (w/m^2), ya que para saber la potencia captada solo hay que multiplicar esta cantidad por la superficie del dispositivo empleado. Los resultados de la exposición de esa masa de cobre me demostraron que podemos captar centenares de vatios por metro cuadrado de superficie sin excesivas complicaciones y en invierno, cuando el Sol brilla a pocos grados sobre el horizonte y luce durante escasas horas. Por otro lado, este experimento puede realizarse con cualquier material buen conductor de calor específico conocido y extenderse en el tiempo. Ello nos permitirá la medición de la fluctuación anual de la radiación térmica efectiva para nuestra situación geográfica.

En la actualidad existen captadores termosolares con rendimientos de más del 80 por ciento. Por tanto, mediante un buen diseño, gran parte de ese calor podrá aprovecharse. Pero, ¿qué tipo de diseño? Sin duda, la mejor vía de aproximación a la energía solar es la térmica. En concreto, la calefacción por aire caliente, ya sea para un mayor confort o para otras aplicaciones no menos interesantes (evaporación y cristalización, cultivo hortícola, secado de ejemplares botánicos, terrarios, etcétera). Las soluciones técnicas para la captación de energía radiante, casi incontables, oscilan entre dos extremos: captación con almacenamiento de energía y sin este. Puesto que una de las condiciones de diseño que nos hemos impuesto pasa por una máxima simplicidad, prescindiremos del almacenamiento y nos centraremos en la obtención de un máximo muy eficaz durante las horas de sol, interrumpiendo el suministro al ocaso.

Empecemos por una somera descripción del captador solar. En esencia, este consiste en un elemento que absorbe la radiación solar y la transfiere a un fluido que se encarga del transporte, aire en este caso. Todo ello ocurre al amparo de una cubierta que impide que la radiación escape y dificulta el enfriamiento del sistema por contacto y difusión con la atmósfera; ello aumenta la temperatura interior por efecto invernadero y establece una circulación, por convección, del aire calentado. Además, lo queremos construir a un

Captador termosolar que funciona por convección natural. En el interior del aula, cuya pared se ha seccionado, se observa el aparato usado para el ensayo de las probetas y la selección de los materiales.



coste mínimo y con materiales de fácil acceso que seleccionaremos mediante un sencillo dispositivo adicional para realizar mediciones.

Para captar la radiación, una placa metálica puede ser la mejor opción. Lógicamente, la pintaremos de negro (color que absorbe casi toda la radiación calorífica). Ahora bien, ¿qué recubrimientos negros hay disponibles y hasta qué punto responden de la misma forma? Deberemos hacer una selección empírica de los pigmentos disponibles: expondremos cada uno de ellos al sol durante un tiempo determinado y mediremos el incremento de temperatura. Para ello, prepararemos una caja aislada, por ejemplo, con poliestireno expandido y recubierta interiormente con papel de aluminio, que habremos adherido con un aerosol reposicionable. En su interior, ensayaremos unas probetas idénticas: placas metálicas altamente conductoras, de cobre o aluminio, de algún milímetro de espesor, redondas o poligonales, y de unos 100 milímetros de extensión, que pintaremos con aquellos materiales que tengamos al alcance. En mi caso: negro mate en aerosol, esmalte sintético mate, esmalte de poliuretano satinado, negro de humo u óxido de níquel en polvo mezclado con una mínima cantidad de goma laca.

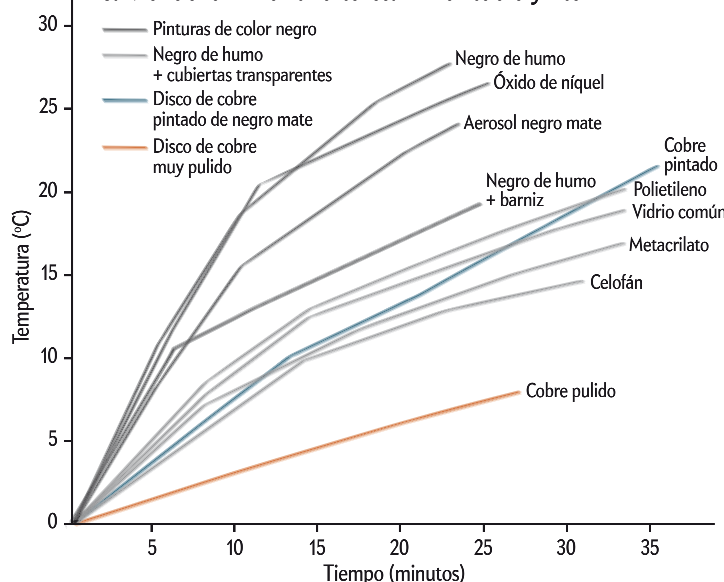
Conseguí la máxima absorción con un recubrimiento obtenido mediante la aplicación del humo de una vela, muy mate, tras repetir la operación varias veces. Mostró tanta absorción que lo consideré un patrón sobre el que valorar el comportamiento de los otros recubrimientos. Cuando el cielo se halla cubierto por nubes que imposibilitan el ensayo, podemos emular una estrella artificial con una bombilla halógena de doscientos vatios o más, o de infrarrojos. En el primer caso, el espectro de emisión es óptimo para el uso de un fotómetro, lo que nos permitirá calibrar su potencia real con respecto a la luz solar.

El montaje, de gran simplicidad, se complementa con algún mecanismo que permita exponerlo perpendicularmente a los rayos de sol: servirá un trípode de fotografía o un atril, que soporte la caja aislada y con el recubrimiento reflectante de su interior perfectamente limpio. En su interior se colocan las probetas armadas con sendos termómetros. Las dispondremos sobre tacos aislantes, fijadas con cinta adhesiva de doble cara. En el caso de utilizar una bombilla, deberemos verificar que la iluminación de las muestras es perfectamente homogénea (dos probetas idénticas deberán mostrar un comportamiento idéntico, incluso al permutar sus posiciones varias veces).

Según mis ensayos (*véase la gráfica*), la mejor opción corresponde a un recubrimiento suave con aerosol negro mate al que se aplica, aun en húmedo, negro de humo en polvo (cuyo exceso se elimina luego con aire comprimido) y se remata con una capa de fijador para carboncillo. Mediante esta receta obtuve, a un coste mínimo, placas de aluminio de gran tamaño recubiertas con un negro mate muy absoluto. Este recubrimiento presenta una ventaja: su coste es mínimo. Pero también un inconveniente: es poco resistente. El lector puede ensayar también con placas anodizadas y recubrimientos galvánicos de cromo «negro», opciones mucho más resistentes pero, eso sí, más caras. Piénsese que el margen de maniobra es muy amplio: podemos experimentar con diversos acabados y texturas superficiales, y distintos soportes, como hierro, cinc o acero inoxidable, que encontraremos en cualquier desguace.

MARC BOADA

El mismo procedimiento se aplica a los recubrimientos transparentes del colector. En este caso, se colocan dos probetas idénticas en el interior de la caja de prueba, recubriéndose cada una con un material distinto. El incremento de temperatura será indicativo de su transparencia a las radiaciones caloríficas. Podemos emplear vidrio común de 3 o 4 milímetros de espesor, metacrilato de grosor similar, acetato, policarbonato, etcétera. Tras varios ensayos, yo me decidí por la película comercial de polietileno que se utiliza en los invernaderos; supera en transparencia calorífica al cristal y su precio es mínimo.



También podemos ensayar con las pinturas que utilizaremos para reflejar la radiación e impedir el intercambio con el medio. Resulta espectacular el contraste entre la pintura blanca (cuyo pigmento es el dióxido de titanio) y todas las demás. Esta permanece fría aun expuesta a un sol intenso, siendo por tanto idónea para concentrar radiación sobre el colector solar.

Para las pruebas con los aislantes, colocaremos sobre dos placas idénticas sendos materiales que queramos ensayar (del mismo espesor). Sobre estos pondremos luego un bloque único a temperatura uniforme, un ladrillo macizo calentado suavemente al horno hasta unos 50 ºC. Con los termómetros mediremos el calentamiento de las probetas. Ello nos indicará sin ambages qué material resulta más o menos útil. Las materias que ofrecen mejores resultados son muy variadas: placas de espuma de polietileno, poliuretano, poliestireno y PVC, papel de periódico, plástico «de burbujas» (excelente) y lana de vidrio. Al final me decidí por estos dos últimos.

Hecha la selección de materiales, queda solo la realización del colector, una parte no menos crítica pero nada complicada. El colector solar más sencillo que he construido y ensayado a fondo consiste en una caja de madera de abeto de 1 metro de lado y 14 centímetros de profundidad. Dispone de un doble fondo de 4 centímetros de espesor relleno con aislante, recubierto exteriormente por una placa de PVC de 3 milímetros y en el interior por una placa de madera contraplacada de 4 milímetros, que, como el resto de la madera, se pintó a fondo con pintura naval blanca brillante de dióxido de titanio.

La tapa transparente consiste en una película de polietileno, que fijé con mucha atención mediante cinta adhesiva de aluminio; entre este y el fondo, en un espacio de unos 10 centímetros de espesor, situé, perfectamente centrada, una placa de aluminio de 2 milímetros, que pinté de negro por ambas caras. Esta chapa es tan ancha como el interior de la caja, pero unos 5 centímetros más corta por arriba y por abajo, de forma que los flujos de aire ascendente están comunicados.

El aire entra por atrás. Proviene de un conducto de 10 centímetros de diámetro, una manga del tejido plastificado que se usa en los aspiradores industriales de polvo. Un tubo idéntico conectado a la cara superior del colector da salida al aire caliente. Para conectar ambos tubos al espacio que se quiere calentar, sustituiremos un cristal por una placa de plástico transparente, a la que acoplaremos los tubos mediante unas embocaduras (disponibles en cualquier ferretería). Por fin, se construye una tapa de madera resistente a la humedad que también pintaremos con un blanco muy brillante. Esta placa, además de permitir tapar el colector, se puede abatir de forma que refleje la luz sobre este, aumentando su potencia hasta un 25 por ciento.

Si exponemos el colector al sol e impedimos la circulación del aire, la temperatura de la placa de aluminio llega con facilidad a los 95 ºC. Al permitir el paso del aire, empieza a circular por convección un flujo muy caliente, de unos 45 ºC (al sol de invierno y con una temperatura ambiental inferior a 10 ºC). En la placa, el aire se calienta, se dilata y asciende, escapando por el tubo superior, que idealmente debería tener una pendiente uniforme. A su vez, crea una depresión, de forma que el aire frío y más denso entra por el conducto inferior, calentándose y alimentando el sistema. La intensidad del fenómeno es tal que el aire caliente que sale apaga una vela. Este colector permite caldear una habitación de casi 60 metros cúbicos, un efecto equivalente al de un calentador eléctrico de 500 vatios de potencia.

¿Serviría ese dispositivo para calentar un aula, taller o laboratorio? Dado que serían necesarios varios metros cuadrados de captadores, ¿podrían optimizarse para incrementar el rendimiento? Para responder estas cuestiones deberíamos ensayar la separación entre cubierta y placa colectora, la textura de esta (mediante pinturas muy rugosas), la posibilidad de dotarla de aletas que aumenten la conducción y transmisión, o la aerodinámica de la circulación del aire.

Asimismo, estoy ensayando un colector en el que la placa metálica se sustituye por un metro cuadrado de tubos de aluminio extensibles de extractor de aire, de unos 10 centímetros de diámetro, montados verticalmente en paralelo y pintados con mi mejor recubrimiento negro. Eso, junto con un ventilador de 12 voltios y un par de vatios (procedente de un ordenador) para forzar la circulación de aire, debería proporcionar una potencia, con el sol de primavera, próxima a la cifra «mítica» de mil vatios por metro cuadrado. Y por menos de cien euros. Se trata de montajes muy competitivos con los sistemas de calefacción tradicionales, tanto en los gastos de instalación como en los de explotación, con el añadido de que su coste energético y ecológico es mínimo: cada hora de exposición al sol de nuestra placa termosolar ahorrará el vertido a la atmósfera de centenares de gramos de CO_2.

Para consultas sobre este experimento, los lectores pueden contactar con el autor a través del blog **Taller y Laboratorio 2.0** *en* www.investigacionyciencia.es/blogs

por Agustín Rayo



Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.

Limones y hospitales

Un paseo por los mercados de información asimétrica

En el año 2001, la Real Academia Sueca de las Ciencias reconoció la labor de los economistas George Akerlof, Michael Spence y Joseph Stiglitz con el más alto honor que un economista puede recibir: el Premio del Banco de Suecia en Ciencias Económicas en Memoria de Alfred Nobel.

En el caso de Akerlof, el galardón le fue otorgado por un artículo escrito más de treinta años antes sobre los *mercados de limones*. (Un «limón», en el sentido que aquí nos ocupa, se refiere a un automóvil defectuoso.) Si bien la idea principal del artículo resulta muy sencilla, sus implicaciones son enormes. El trabajo dio lugar a una nueva rama, la *economía de la información*, dedicada al estudio de los mercados con información asimétrica.

Autos usados

Imaginemos un mercado ideal de autos de segunda mano. Supongamos, en primer lugar, que hay un solo modelo a la venta: el Fiat Multipla 1998. Sin embargo, no todos los Multipla usados se encuentran en el mismo estado de conservación: algunos, de categoría «alta», se hallan en excelentes condiciones, por lo que no requerirán más que un mantenimiento rutinario; otros, los de calidad «media», ocasionarán algunos problemas a sus nuevos dueños, pero no demasiado graves. Por último, los autos de categoría «baja» son *limones*: necesitarán reparaciones frecuentes y costosas. Por simplicidad, consideraremos que un tercio de los automóviles en venta pertenecen a cada clase.

Supongamos también que existe una *asimetría de información* entre compradores y vendedores: aunque todos saben que un tercio de los automóviles en venta pertenece a cada una de las categorías anteriores, solo los vendedores conocen la calidad de su vehículo. Los compradores, por el contrario, no sabrán el verdadero estado en el que se encuentra un coche sino después de haberlo adquirido.

Por último, daremos por sentado que los compradores valoran los vehículos más que los vendedores. Para trabajar con números concretos, supongamos que los compradores están dispuestos a pagar 20 € o menos por un auto de calidad alta, un máximo de 14 € por uno de categoría media y, como mucho, 2 € por un limón. Por su parte, los vendedores aceptarán un trato siempre y cuando se les ofrezca, al menos, el 65 por ciento de las cantidades anteriores. Así, el dueño de un vehículo de calidad alta estará dispuesto a venderlo por 13 € o más; el de uno de categoría media, por 9,10 € o más, y el propietario de un limón, por 1,30 € o más.

El hecho de que los vendedores valoren sus autos menos que los compradores garantiza que toda compraventa generará un *beneficio económico*. Imaginemos que un coche de calidad alta se vende por 16 €. El vendedor obtendrá un excedente económico de 3 € (ya que recibe 16 € por un vehículo que él valora en 13 €) y el comprador logrará un beneficio de 4 € (pues ha abonado 16 € por un auto que él tasa en 20 €). Vemos, pues, que la transacción ha generado un beneficio económico neto de 3 € + 4 € = 7 €. (De hecho, dado que los compradores están dispuestos a pagar hasta 20 € y los dueños aceptan las ofertas superiores a 13 €, toda compraventa generará un beneficio total de 7 € con independencia del precio de venta.)

En un mercado como el que acabamos de describir, el resultado de Akerlof puede describirse como sigue:

> *Siempre y cuando compradores y vendedores se comporten de manera plenamente racional, el mercado evolucionará de tal modo que los dueños de los autos de calidad alta y media acabarán retirando sus vehículos del mercado. Al final, solo quedarán limones.*

Para entender por qué, comencemos por formularnos la siguiente pregunta: ¿cuál es el máximo que un comprador está dispuesto a ofrecer por un coche? Si conociera la calidad del vehículo, la respuesta resultaría sencilla: 20 € por un auto de calidad alta, 14 € por uno de categoría media y 2 € por un limón. Pero, dado que lo único que saben los compradores es que un tercio de los automóviles pertenece a cada categoría, ninguno de ellos accederá a pagar más que el valor promedio de las cantidades anteriores: (20 € + 14 € + 2 €)/3 = 12 €.

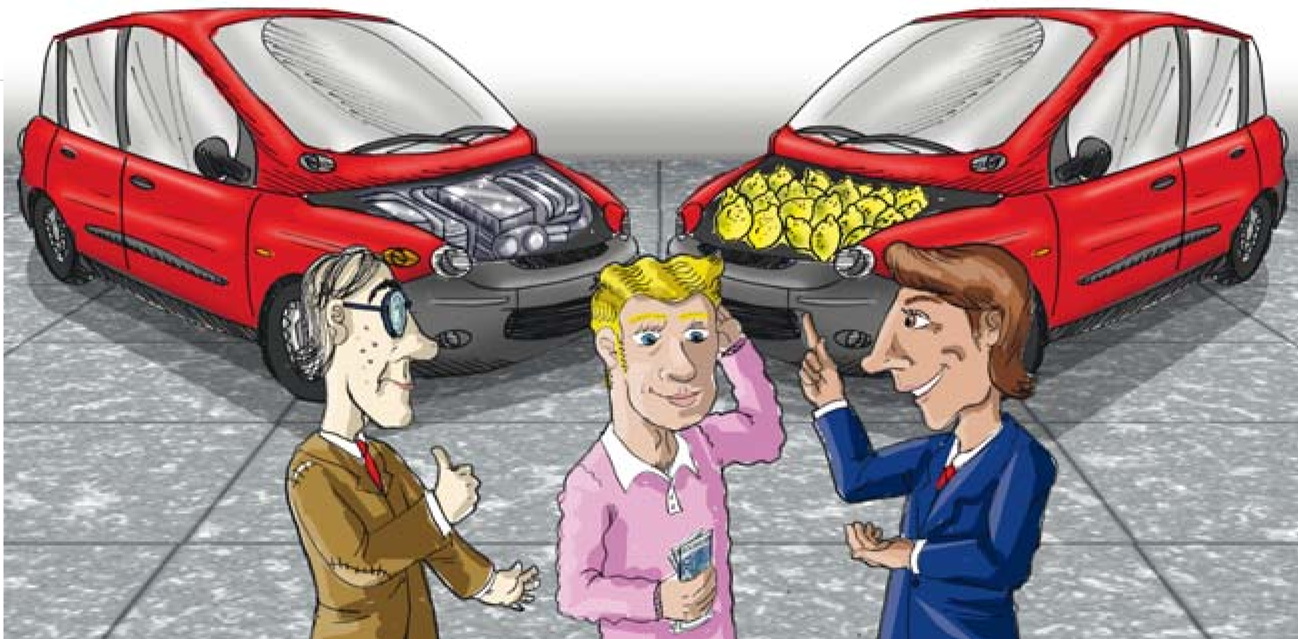
Examinemos ahora las consecuencias desde el punto de vista de los vendedores. Estos saben que no pueden esperar más de 12 € por un coche. Sin embargo, el dueño de un auto de calidad alta no está dispuesto a venderlo por menos de 13 €. Por tanto, los autos de calidad alta no tendrán salida en el mercado y acabarán siendo retirados.

Nos hemos quedado con un mercado que solo ofrece, en proporciones iguales, coches de calidad media y baja. Al igual que antes, esta circunstancia determina el precio máximo que cualquier comprador racional decidirá pagar por un vehículo. Al igual que antes, podemos concluir que nadie pagará más de (14 € + 2 €)/2 = 8 € por un automóvil de segunda mano.

Dado que el poseedor de un vehículo de categoría media no se conformará con venderlo por menos de 9,10 €, estos autos también desaparecerán del mercado. Al final, tal y como avanzaba el resultado de Akerlof, nos hemos quedado con un mercado en el que todos los autos son limones.

Mercados eficientes

En un mercado de limones existe una reserva de vehículos (los de calidad media y alta) que no tienen salida. En vista de que sus dueños los valoran menos que los compradores, comerciar con ellos generaría un beneficio económico. Sin embargo, se han creado unas condiciones que imposibilitan que dicho beneficio se materialice. En este sentido, *un mercado de limones resulta ineficiente*.



En un mercado de información asimétrica, en el que los compradores desconocen la calidad de los automóviles de segunda mano, los dueños de los vehículos en buenas condiciones no pueden venderlos más caros que los dueños de *limones* y terminarán por retirarlos del mercado.

¿Cómo evitar esa clase de situaciones? Una solución consistiría en introducir algún mecanismo que informase a los compradores sobre la calidad de los vehículos antes de adquirirlos. Si los dueños de un auto de clase alta pudieran exhibir un certificado de calidad, se activaría la compraventa de esos automóviles por cantidades comprendidas entre 13 € y 20 €, lo que generaría un beneficio económico de 7 € por cada transacción.

Los mercados reales incluyen procedimientos de ese tipo. Algunas compañías expiden certificados de calidad para coches de segunda mano, lo que permite que los vehículos de calidad se vendan a precios más altos. Y, por supuesto, un vehículo completamente nuevo goza de una garantía muy poderosa. Una razón por la que un automóvil pierde tanto valor inmediatamente después de haber abandonado la fábrica reside en que, a partir de ese momento, se vuelve mucho más difícil para su dueño certificar la calidad del vehículo.

Seguros y hospitales

Pero los certificados de calidad no suponen la única manera de mejorar la eficiencia del mercado. Consideremos, por ejemplo, el problema de la cobertura sanitaria en Estados Unidos: existen numerosas personas que, debido a su situación económica, no pueden costearse un seguro médico. Lo ideal sería introducir seguros de bajo costo accesibles para todos. Sin embargo, esto no es tan fácil como parece, pues corremos el riesgo de acabar con el equivalente médico de un mercado de limones.

Al igual que no todos los vehículos de segunda mano se encuentran en idénticas condiciones, tampoco todas las personas gozan del mismo estado de salud. Un individuo completamente sano requerirá muy poca atención médica a lo largo de su vida; alguien con una salud algo más endeble demandará más cuidados, y una persona muy propensa a enfermar desempeñará un papel equivalente al de un *limón*: necesitará atención médica constante y cara. Por su parte, las aseguradoras no suelen poseer una información completa sobre el estado de salud de sus posibles clientes, por lo que no siempre estarán en posición de ofrecer primas bajas a los individuos sanos. Para decidir el precio de sus pólizas, se verán obligadas a promediar los costos derivados de tratar a personas con niveles de salud muy diferentes.

Los clientes, en cambio, sí suelen contar con información detallada sobre su estado de salud. Una persona completamente sana podría pensar que, en caso de abonar la cuota promedio, estaría pagando más de lo que le corresponde, con lo cual tendría un incentivo para no contratar el seguro. Pero, cuantos más clientes saludables pierdan las aseguradoras, más se elevarán sus costos y más se encarecerán las primas. Y si estas aumentan demasiado, las compañías perderán también a los clientes con un estado de salud intermedio. Al final se quedarán, por tanto, con un «mercado de limones».

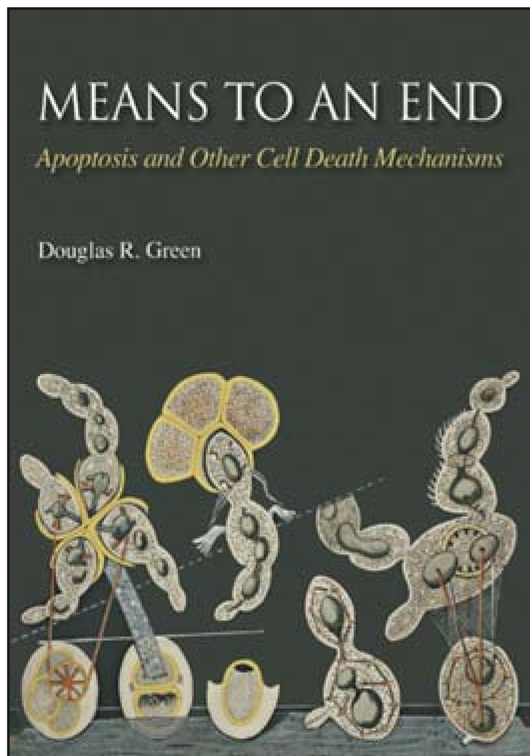
Como ya vimos, una manera de mejorar la eficiencia de este tipo de mercados consiste en introducir certificados de calidad. (Cuando una aseguradora pregunta a sus clientes si son fumadores, implementa una versión de esta propuesta.) Pero, en 2010, el presidente Barack Obama introdujo un mecanismo alternativo: la *obligación* de contratar un seguro médico.

La iniciativa de Obama adolece de un inconveniente: la gente que goza de una salud excelente se verá obligada a pagar por un seguro más de lo que cuesta su cuidado médico. Sin embargo, trae consigo dos ventajas importantes. En primer lugar, pone en marcha un mercado más eficiente, con lo cual se genera un mayor beneficio económico. (Ese beneficio, no obstante, no se distribuye de manera equitativa, ya que los individuos más saludables transfieren recursos a quienes no lo son tanto.) Por otro lado, la propuesta de Obama facilita que las personas con bajos recursos económicos accedan a un seguro médico barato aun cuando sufran problemas graves de salud.

El próximo mes de marzo, el Tribunal Supremo de Justicia de Estados Unidos comenzará a deliberar sobre la constitucionalidad de la reforma sanitaria propuesta por Obama. Pocas decisiones de la corte comportarán consecuencias tan profundas para el futuro del país.

PARA SABER MÁS

El artículo original de Akerlof es **The market for «lemons»: Quality uncertainty and the market mechanism** («El mercado de "limones": Incertidumbre de calidad y el mecanismo del mercado») y fue publicado en 1970 en el *Quarterly Journal of Economics*, después de ser rechazado por otras tres revistas. Wikipedia cuenta con una buena introducción en español a la teoría de la información asimétrica: **es.wikipedia.org/wiki/Información_asimétrica**



MEANS TO AN END. APOTOSIS AND OTHER CELL DEATH MECHANISMS,

por Douglas R. Green. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 2011.

Apoptosis

Muerte celular programada y otras formas de autoaniquilación

No muere solo el organismo; también las células componentes de los tejidos. Cada segundo, en nuestro cuerpo mueren del orden de un millón de células, a través de unos mecanismos de muerte que han persistido a lo largo de más de mil millones de años de evolución. Aunque la muerte celular constituye un componente principal de la enfermedad, la expresión *muerte celular programada* remite a la que acontece en un punto genéticamente prescrito del desarrollo, con la eliminación consiguiente de las células implicadas. La muerte celular es un fenómeno central de las homeostasis propia y de adaptación a un ambiente cambiante; puede tener una función inductiva o de andamiaje en los tejidos en desarrollo o hallarse implicada en etapas de selección. Interviene en la formación de estructuras y en el control del número de células. A ese fenómeno debemos, por ejemplo, la formación de dígitos en las extremidades. Cuando, por alguna razón, no se produce la muerte celular, las consecuencias pueden resultar catastróficas, manifestándose en forma de cáncer, autoinmunidad y otras patologías. Si la muerte celular ocurre en un lugar y tiempo erróneos, puede precipitarse un ictus, la degeneración, cardiopatías y otros muchos daños.

Existen tres tipos principales de muerte celular: apoptosis, muerte celular autofágica y necrosis. Podríamos también agregar la catástrofe mitótica. La apoptosis, o muerte celular de tipo I, significa «caída de». En su origen remite a la caída de la hoja de los árboles; pasó a designar la pérdida aleatoria de células en los tejidos. Durante la apoptosis, el contenido de las células permanece retenido por las membranas, se condensa la cromatina y se produce el fraccionamiento del ADN. Los cuerpos apoptópicos se eliminan rápidamente de otras células sanas en un tiempo muy corto, sin que quede rastro que permita inferir que allí hubo una célula.

La muerte celular autofágica, o muerte celular de tipo II, se caracteriza por la aparición de grandes vacuolas en el citoplasma, así como marcadores moleculares de autoalimentación. El empaquetamiento de la célula moribunda y las señales que envía a otras células para retirarlas se realizan mediante la fragmentación de cientos de proteínas. En general, los rasgos característicos de la apoptosis (condensación nuclear, fragmentación de la cromatina) no se observan, ni las caspasas ejercen ninguna función. La muerte celular autofágica puede ser víctima de su propio nombre; en su mayor parte, ni la autofagia (un mecanismo de supervivencia) ni los componentes moleculares de la vía de la autofagia son responsables de la muerte celular autofágica. En general, la autofagia se considera un mecanismo de supervivencia para las células. La autofagia aporta energía cuando los nutrientes externos se han agostado o se hallan alteradas las vías de su ingesta, elimina los orgánulos y otros componentes celulares excedentes o dañados. Se halla implicada en la degradación de proteínas que han vivido mucho y de agregados proteínicos de las células. La autofagia funciona también en la defensa celular para destruir los organismos invasores. La autofagia implica la generación de vesículas de membrana en la célula (autofagosomas) que encierran el citoplasma, orgánulos, agregados de proteínas u organismos invasores y los portan a los lisosomas, con los que se fusionan los autofagosomas. Las enzimas degradadoras de los lisosomas fragmentan los contenidos, que vuelven a emplearse como fuentes de energía y materia prima de la célula.

En la necrosis, o muerte celular de tipo III, los orgánulos se hipertrofian y la célula se hincha, explota y se descompone. La cromatina no se condensa aquí tampoco. La necrosis puede acontecer cuando la membrana del plasma se rompe o cuando los niveles de energía caen tan bruscamente que las células no pueden autosustentarse. Existen, sin embar-

go, formas de necrosis que están programadas, es decir, células que contienen vías de suicidio que resultan en necrosis, no en apoptosis. Cuando se genera piel, los queratinocitos mueren a través de un proceso de *cronificación*, en el que el núcleo se degrada y las proteínas de la célula se entrecruzan para construir un material muerto, duro, que forma una barrera importante en el organismo. Las neuronas pueden acometer necrosis activa en respuesta a altos niveles de glutamato, un neurotransmisor del cerebro. La necrosis neuronal inducida por glutamato suele denominarse *excitotoxicidad* o muerte excitotóxica. Por fin, durante la mitosis, la membrana nuclear se disuelve y los cromosomas se segregan hacia los polos de una célula en proceso de división. Si ese proceso se subvierte, las células mueren por lo que se llama catástrofe mitótica. Sucede cuando el ADN sufre un daño general o se estropea la maquinaria celular. A menudo la catástrofe mitótica resulta en apoptosis.

Comparado con lo observado en los procesos de síntesis y generativos, los biólogos han avanzado con lentitud en el reconocimiento e investigación de los procesos de degradación. Por botón de muestra, nuestro grado de comprensión de la proteolisis dista mucho del nivel adquirido en el conocimiento de la síntesis de proteínas. Y así ocurrió con la muerte celular, cuyo estudio va años por detrás de la comprensión de la división de la célula. Aunque se sabía, desde hacía tiempo, que la muerte celular constituía un aspecto determinante del desarrollo normal del animal y de la homeostasis de los tejidos, hubo que esperar a 1972 para que J. F. Kerr, A. H. Wyllie y A. R. Curie establecieran una distinción clara entre los caracteres citológicos de la muerte celular normal y los muy diferentes de una muerte celular patológica. Acuñaron el término apoptosis para el primer tipo de muerte celular y, lo más importante, sugerían que podría reflejar la operación de un programa de muerte intracelular, por el cual las células animales podían suicidarse de una forma limpia y controlada.

La idea permaneció en letargo unos veinte años. Fue, a finales de los ochenta, cuando H. R. Horvitz abordó la identificación genética de las proteínas intracelulares que median y regulan la apoptosis en el nemátodo *Caenorhabditis elegans*; poco después, vino la demostración de que otras proteínas afines operaban de manera similar en otros animales, hombre incluido. No tardó en evidenciarse que las caspasas mediaban el programa de muerte por apoptosis y que una familia de proteínas reguladoras, las BLC-2, activaban o reprimían el proceso. De tales hallazgos se infería la naturaza crítica de la apoptosis y la conservación, en el curso evolutivo, de las proteínas que median y regulan el proceso. La apoptosis venía orquestada por las caspasas, unas proteasas, que residen en forma inactiva en casi todas las células humanas.

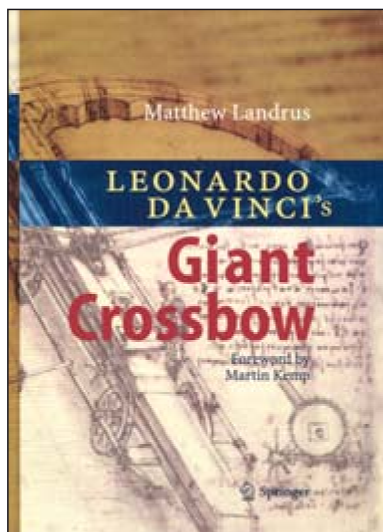
Al activarse, algunas caspasas segmentan cientos, si no miles, de proteínas específicas; lo hacen internamente, no por los extremos. Son, pues, endopeptidasas. Por lo común, cortan secuencias específicas que terminan en residuos de aspartato y cortan inmediatamente después este aminoácido. En el centro activo de las caspasas encontramos una cisteína. Existen diferentes tipos de caspasas, que se distinguen por sus funciones, estructura de las proformas y mecanismo de activación. Hay caspasas «ejecutoras», presentes en las células sanas, aunque en forma inactiva. Se activan cuando son, a su vez, segmentadas por otras proteasas, las caspasas «iniciadoras». Estas se encuentran presentes en células sanas. Las caspasas «iniciadoras» son inactivas hasta que dos cadenas idénticas se conjugan mediante proteínas «adaptadoras» para producir una enzima activa. Diferentes proteínas «adaptadoras» intervienen en distintos estímulos apoptópicos y definen diversas vías apoptópicas. Cuando las adaptadoras promueven la activación de las caspasas iniciadoras, las últimas activan las caspasas ejecutoras. Las caspasas ejecutoras fragmentan cientos de sustratos y la célula emprende la apoptosis.

El modo principal de apoptosis en los vertebrados es la *vía mitocondrial*. Esa vía de muerte celular viene instada por una vasta disposición de tensiones de la célula. Toman parte activa en la vía mitocondrial la familia de proteínas BCL-2, que controla la integridad de las membranas externas de las mitocondrias. Los efectores BCL-2 propapoptópicos disgregan las membranas mitocondriales exteriores, mientras que las proteínas BCL-2 antiapoptópicas evitan esto y, por tanto, también la apoptosis. Un tercer conjunto de proteínas BCL-2 regula los dos tipos precedentes. Si se produce la permeabilización de la membrana externa mitocondrial, se difunden en el citosol proteínas solubles del espacio intermembranal (entre las membranas mitocondriales externas e internas). Entre tales proteínas advertimos la presencia del citocromo c, que desempeña un papel central en la fisiología mitocondrial. Cuando el citocromo c alcanza el citosol, interacciona con una proteína adaptadora allí presente, provocando su oligomerización y su enlace con una de las caspasas iniciadoras. Esa se activa, entonces. Y, a su vez, segmenta y, por tanto, activa las caspasas ejecutoras que fragmentan los substratos. Muchos de los acontecimientos que ponen a la célula en tensión (pérdida de factores de desarrollo, resquebrajamiento del citoesqueleto, agregación de proteínas, etcétera) optan por la vía mitocondrial de la apoptosis, una vía desencadenada a veces por las señales de desarrollo y por mecanismos de supresión de tumores.

La activación de las caspasas y la apoptosis implica, en otras ocasiones, receptores especializados sobre la superficie celular. Cuando los ligandos de estos receptores de muerte —así se llaman— se enlazan, su región intracelular activa una molécula adaptadora específica (distinta de la observada en la vía de la mitocondria). Esta activa una caspasa iniciadora (distinta también de la observada en la vía mitocondrial). La caspasa iniciadora fragmenta y, por tanto, activa las caspasas ejecutoras. La vía del receptor de muerte viene instada por ligandos específicos que se enlazan con los receptores.

La infección de la célula induce también apoptosis. Nuestras células poseen sensores que detectan la infección; algunos de ellos operan también para descubrir la presencia de adaptadores (distintos de los de otras vías) para un tipo de caspasa relacionada con las caspasas iniciadoras. Además de activar las caspasas ejecutoras y causar la apoptosis, esta caspasa procesa y permite también la secreción de mediadores que avivan las defensas del huésped en su lucha contra la infección. En cuanto una célula muere, las demás células del cuerpo eliminan presto el cadáver. Las células que acometen apoptosis producen señales, como consecuencia de la activación de las caspasas, que atraen células capaces de ingerirlas y otras señales que causan su remoción antes de que la membrana del plasma se resquebraje. Las células necróticas, por el contrario, liberan moléculas intracelulares que participan en la limpieza, si bien provocan la inflamación del tejido.

—Luis Alonso



LEONARDO DA VINCI'S GIANT CROSSBOW,

por Matthew Landrus. Springer Verlag; Berlín, Heidelberg, 2010.

La *gran ballesta* de Leonardo da Vinci

O la gran síntesis de Leonardo artista e ingeniero

Durante más de cuarenta años, frente a mi mesa de trabajo en la universidad, he observado cotidianamente el dibujo de la *gran ballesta* de Leonardo da Vinci, herencia del anterior catedrático de ingeniería mecánica. Su proximidad a un dibujo de diseño técnico actual resulta asombrosa y cautivadora.

En su tratado sobre la *gran ballesta* de Leonardo, Matthew Landrus, especialista en historia del arte y de la ciencia en la transición del Medioevo al Renacimiento en Italia, pone de manifiesto la espectacular síntesis de arte e ingeniería realizada por Leonardo. Consciente de las limitaciones de la ciencia de su época, recurre a sus conocimientos como artista y a su extraordinaria capacidad de observación para intentar dar respuesta a los interrogantes que plantea su ambicioso proyecto.

El autor parte de la carta de Leonardo a Ludovico Sforza, duque de Milán, en la que se presenta como experto en diez ámbitos técnicos, nueve de ingeniería militar y uno de arquitectura. Se ofrece, además, como pintor y escultor. Aunque pacifista por su actitud humanista, Leonardo recurre a su habilidad como ingeniero para conseguir el patrocinio de los poderosos, y elige el ámbito militar consciente del hecho de que estos son más proclives a patrocinar nuevo armamento que obras de arte. Por ello prepara numerosos dibujos previstos para un tratado de ingeniería militar. A diferencia de sus otros dibujos de inventos, que tan solo pretendían ofrecer una visión de su aspecto, el dibujo de la *gran ballesta* muestra una información precisa de proporciones, dimensiones y detalles constructivos con objeto de superar su examen por parte de ingenieros militares expertos. A pesar de su osadía, el proyecto es técnicamente verosímil.

Landrus hace especial énfasis en las distintas facetas de la geometría implicadas en la *gran ballesta*. Por una parte, está el diseño basado en proporciones realizado por medio de compás, regla y escuadras, usual en la época por la dificultad en la utilización de valores numéricos. Destacan la proporción 1/3 y la división de la circunferencia en seis partes iguales. Según el autor, la dimensión de partida en el diseño es la longitud del bastidor, tomada como radio de la circunferencia cuya sexta parte define la longitud del arco de la ballesta, las 42 *braccia* de su anchura. Este valor es múltiplo de 2, de 3 y también de 7, número con notable influencia en el diseño tanto por su relación con la aproximación de Euclides para el número pi como por su intervención en las proporciones del cuerpo humano, bien conocidas por Leonardo.

El autor destaca asimismo la proyección empleada, distinta de las proyecciones visuales usualmente utilizadas por Leonardo en sus dibujos. Se trata de una proyección paralela con ejes de escala unitaria en el plano horizontal a 0 y 60 grados que, al tiempo que proporciona una imagen próxima a la visual, permite tomar directamente las dimensiones en los dos ejes horizontales de la ballesta. Con esta proyección, Leonardo se avanzó a la geometría descriptiva que Monge formalizaría tres siglos más tarde.

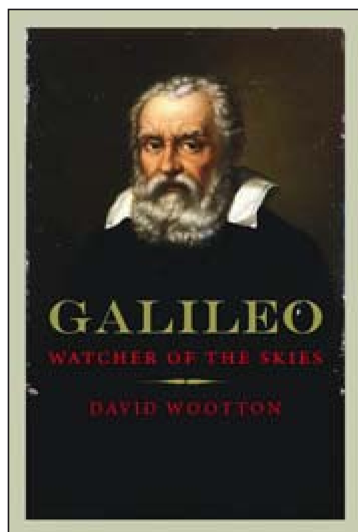
Landrus presta especial atención al «escalado»: ¿cómo decidió Leonardo la longitud de 42 *braccia* para el arco de la ballesta? Conocía las prestaciones de las ballestas personales y de algunas ballestas de dimensiones superiores, pero ¿cuánto mayor debía ser una ballesta para poder lanzar piedras de 100 libras a 40 *braccia?* La solución pertenecía al ámbito de la dinámica, muy poco elaborada en su época. Leonardo conocía la teoría del *ímpetus* de Aristóteles y era consciente de sus limitaciones. Más interesado en la aplicación de la ciencia que en su teorización, recurrió a la utilización transversal de sus conocimientos. Las limitaciones en la formulación de la mecánica, junto a las de cálculo, reducían prácticamente los cálculos mecánicos a la utilización de la «regla de tres», realizable por trazado geométrico. Pero el estudio de la relación entre el tensado de una ballesta y su alcance le llevó a la conclusión de la falta de proporcionalidad entre ambos y a proponer una solución genial y muy avanzada a su época: la *proporcionalidad piramidal*, que incorporaba la «no linealidad» de la proyección cónica. El conocimiento artístico de Leonardo resolvía de forma pragmática un problema que tardaría todavía un par de siglos en quedar solucionado por la ciencia.

En esta parte del libro, dedicada a la dinámica de la ballesta, la presentación no sea tal vez suficientemente crítica y matizada. Si bien se aportan numerosas citas y datos de los escritos de Leonardo y del entorno científico a su alcance, la información que se presenta y los comentarios que la acompañan son a menudo confusos. Sin embargo, los comentarios de Martin Kemp sobre la mecánica de la ballesta, tanto los del prólogo como el que aparece citado en el cuerpo principal del libro, destacan por su claridad y acierto.

El estudio del proceso de diseño seguido por Leonardo se completa con la presentación pormenorizada de los trazos con estilete que se encuentran en el dibujo de la *gran ballesta*, así como de los puntos de apoyo del compás de puntas.

Globalmente, el tratado de Landrus ofrece a quienes se sienten atraídos por la *gran ballesta* y la filosofía de diseño propia de Leonardo una información ingente, inaccesible de otra forma y que, en el ámbito de la mecánica, abre las puertas a una profundización en su modelización dinámica. Esto hace del libro una obra de referencia única.

—Joaquim Agulló Batlle
Universidad Politécnica de Cataluña



GALILEO: WATCHER OF THE SKIES,

por David Wootton. Yale University Press; New Haven y Londres, 2010.

¿Era Galileo católico?

Ciencia, historia conjetural y ficción literaria

Galileo es objeto de interpretaciones muy diversas. No es extraño, ya que representa una de las crisis fundamentales del mundo moderno y toda crisis implica una tensión entre posiciones contrarias presentes, en primer lugar, en sus mismos protagonistas. Platónico o empirista; rebelde inconformista o cortesano en busca del aplauso; obstinado defensor de su libertad intelectual o sumiso ante la conveniencia social o la imposición autoritaria, Galileo es siempre una figura compleja, incluso contradictoria.

Esto no impide que surjan periódicamente intentos de desvelar el «auténtico» Galileo. Wootton nos ofrece el suyo: un apasionado panorama de la vida del científico. Quiere ser una «historia conjetural», la que quizá tendríamos si hubieran sobrevivido todos los documentos, en particular los que mostraban un Galileo distinto de la figura de sabio católico —si no exactamente devoto, al menos sincero creyente— que en público procuraba ofrecer.

Si fuera este su único contenido, seguramente esta reseña no tendría espacio en estas páginas. Afortunadamente da pie a un brillante recorrido por la trayectoria científica y humana de Galileo. Wootton explora con atención numerosos particulares del trabajo científico de Galileo, pero también de sus relaciones sociales, económicas y humanas, que dan a la narración una vivacidad difícilmente superable. A ello contribuye, sobre todo, una actitud de desafío frente a las interpretaciones aceptadas. Wootton se esfuerza por presentar bajo nueva luz tanto los episodios centrales de la ciencia y del carácter intelectual de Galileo, como aspectos aparentemente marginales de sus relaciones familiares y sociales —que, al menos en la percepción del autor, van reforzando la tesis principal del libro.

Entre los primeros se hallan puntos de indudable interés. Así, por ejemplo, Wootton intenta defender la profesión de copernicanismo que Galileo hace en su carta a Kepler en 1597, intentando mostrar que ya a partir de 1592 interpretaba el movimiento de los proyectiles en términos de cierta inercia circular relacionada con el movimiento de la Tierra. La teoría de las mareas, argumento central del *Diálogo*, estaría ya presente entre los «muchos fenómenos naturales» que Galileo dice haber explicado a partir de la hipótesis copernicana. Para Wootton toda la ciencia de Galileo, tanto el *Diálogo* como las *Dos nuevas ciencias,* había sido ya planeada en el período de 1592 a 1602.

Otras reflexiones de gran interés se refieren al papel de la experimentación. Galileo crea la ciencia experimental, dando a la noción de «hecho» su sentido actual (en vez de una general «experiencia»). Pero al mismo tiempo su pensamiento se inclina siempre hacia la teoría —Wootton se resiste a considerarlo platónico: sería más bien pitagórico—, de modo que el suyo es un «empirismo reluctante».

Las interpretaciones originales son muchas más, pero es en esos dos puntos donde Wootton condensa sus propuestas principales sobre la ciencia de Galileo. A ellas se añaden las que se refieren a la dimensión personal, filosófica y religiosa. Dejaremos su juicio al eventual lector. Pero es necesario notar que, al proceder en su argumentación, Wootton parece olvidar con frecuencia el carácter conjetural de sus propuestas. La «conjetura histórica» se transforma casi inadvertidamente en nueva premisa, y por fin en dato aceptado. Y esto hace que al concluir la lectura quede cierta insatisfacción.

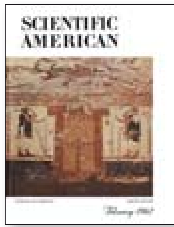
Un ejemplo puede bastar. A finales de 1622 Galileo termina *Il Saggiatore* y emprende una revisión de su teoría de las mareas. ¿Por qué, si hasta la elección de Urbano VIII, en 1623, no creyó posible reabrir la cuestión copernicana? Para Wootton la solución no es difícil: en 1633 Allacci relata una visita de Diodati a Galileo; si tuvo lugar en otoño de 1622, Diodati pudo convencer a Galileo de la posibilidad de publicar fuera de Italia, como Campanella acababa de hacer, y ofrecerse para facilitarla. Esta visita suele fijarse en 1626, pero no todos los datos cuadran. El mismo Diodati habla en 1635 de una visita quince años antes (aunque esto llevaría a 1620, antes de que Campanella publicara en Frankfurt). En cualquier caso, una conjetura interesante. Lo que ya no parece conjetura es la conclusión: *evidentemente* Galileo tenía intención de seguir este plan; años más tarde él mismo, o quizá Viviani, destruyó toda evidencia, ya que hubiera sido una prueba de que nunca tuvo intención de respetar ni la condena del copernicanismo ni el precepto de 1616.

Razonamientos similares llevan a descubrir una nueva hija ilegítima, y no reconocida, de Galileo (pero no se da cuenta de que la principal evidencia, el empeño en casarla con su sobrino, excluye categóricamente tal relación, ya que no hubiera sido posible el matrimonio entre primos en primer grado), a descubrir un supuesto cuerpo de doctrinas esotéricas entre sus discípulos, a identificar como elemento decisivo del proceso de 1633 la amenaza por parte de Maculano de sacar a la luz la conocida denuncia de atomismo, y un largo etcétera. La falta de delimitación entre conjeturas y hechos constituye el punto débil de Wootton, que se refleja especialmente en su objetivo final. La tesis de que Galileo fue creyente solo de nombre aparece como conclusión de conjeturas débiles (un concepto esquemático y casi naif de creyente) y de ignorar cualquier evidencia contraria.

Según Wootton, los estudios académicos han interpretado mal a Galileo; él se decanta por el Galileo de Brecht, que es desde luego una narración apasionante... pero una obra de ficción. Quizás esto explique algunas características de esta nueva vida de Galileo.

—Rafael A. Martínez Romeo
Universidad Pontificia de la Santa Cruz

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



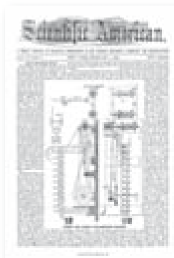
Febrero 1962

Códigos de error

«Hasta hace poco, los ingenieros deseosos de mejorar la calidad de un canal de comunicación centraban sus esfuerzos en reducir el ruido, o para ser más exactos, en aumentar la relación entre señal y ruido. La forma más fácil de lograrlo consiste en ampliar la potencia de la señal. A lo largo de los últimos 15 años, un sinnúmero de dispositivos procesadores de señal —en particular, la computadora electrónica— han propiciado un enfoque distinto para transmitir datos con el mínimo error: el uso de códigos autocontrolados. El principio en el que se basan esos códigos es antiguo. Entre las novedades que ofrecen cabe destacar: (1) el cuerpo teórico que informa al ingeniero del grado de perfección de las prestaciones de cada código y (2) las técnicas para elaborar códigos.»

Secretos nucleares

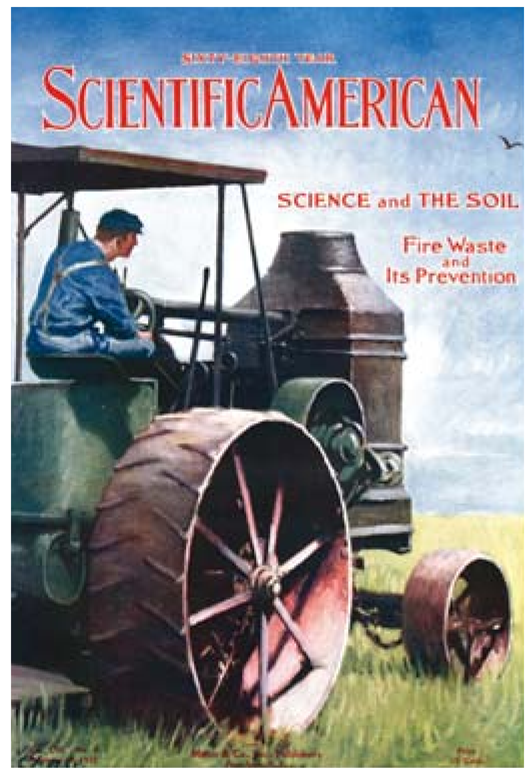
«Parece cada vez más dudoso que se puedan ocultar la pruebas de armas nucleares de cierta magnitud, se realicen estas bajo tierra o en el espacio ultraterrestre. Una explosión nuclear de cinco kilotones llevada a cabo en diciembre, cerca de Carlsbad (Nuevo México), fue nítidamente registrada por sismógrafos de lugares tan lejanos como Tokio, Nueva York, Upsala y Sodankylä (Finlandia). Las grabaciones sismográficas incluían los trazos del "primer movimiento" considerado crítico para distinguir entre un terremoto y una explosión subterránea.»



Febrero 1912

La máquina desplaza a los músculos

«Probablemente ninguna novedad agrícola de los últimos diez años resulte de mayor interés y trascendencia que el rápido avance del uso del tractor. La aparición del tractor de gasolina representó el primer paso hacia la mecanización agrícola en todo el mundo. En el pasado, el trillador apenas cumplía el papel de operario inmóvil. Con la aparición del tractor universal, sus funciones se multiplicaron. Además de mantener a punto la máquina, tuvo que aprender a conducir con pericia, sortear zanjas y obstáculos y, sobre todo, ganar dinero para el dueño del equipo, lo que conseguía al darle un uso continuo. La necesidad ha creado un nuevo tipo de trabajador: un agricultor técnico de gran calibre, lacónicamente llamado tractorista.»



Tractoristas: La nueva generación de agricultores nos lleva hacia la era de la agricultura mecanizada, 1912.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVI, N.º 6; 10 DE FEBRERO DE 1912

La ametralladora Vickers

«Recientemente ha hecho aparición una versión mejorada del arma ligera automática Vickers de calibre fusil, que ha llamado la atención por su mayor movilidad y su ingenioso trípode. Además, se ha reducido de forma notable su peso: mientras el modelo antiguo pesaba 34 kilogramos en condiciones de disparo, el nuevo pesa solo 18 kilogramos. Esta disminución se ha conseguido gracias al empleo de acero de alta calidad, en vez de bronce para cañones, en la fabricación de todas las piezas.»

Esa ametralladora fue empleada con frecuencia en la I Guerra Mundial, que estalló dos años después. En www.scientificamerican.com/feb2012/warfare se ofrecen imágenes relativas a la tecnología armamentística y de guerra en 1912 procedentes de los archivos de Scientific American.

Febrero 1862

Homeopatía en el ejército

«El Comité de Asuntos Militares de la Cámara de Representantes está considerando la posibilidad de introducir en el ejército el método de Samuel Hahnemann, la homeopatía. Se acordó autorizar al señor Dunn para que informe un proyecto de ley que ordena a la Agencia Médica del Departamento de Guerra que, bajo ciertas limitaciones en cuanto al número y requisitos personales, permita emplear como médicos militares a licenciados de facultades de homeopatía reconocidas. Esta medida ha sido duramente combatida en el Comité, y a ella se opone en bloque toda el cuerpo médico del ejército. Sabemos que el general McClellan, firme partidario de la homeopatía, está deseoso de probar el método en el ejército. ¿Por qué no hacerlo? En el país tiene miles de partidarios y está ganando terreno con rapidez.»

Sal y nieve

«La práctica de echar sal a los raíles de los ferrocarriles metropolitanos, que mantiene la nieve en estado semilíquido, ha hecho que algunos ediles y otras personas hayan decidido exponer los males, o supuestos males, que de ello puedan derivarse. El Consejo Ciudadano de Filadelfia convocó a algunos expertos científicos para que ofrecieran su testimonio. El profesor Rand, del Instituto Franklin, no creía que se registrara una mayor mortalidad infantil a causa de trastornos catarrales desde que se arroja sal a las vías. La diferencia entre usar sal o no usarla es que, con sal, la nieve a medio derretir tal vez dure solo un día, mientras que sin ella la nieve podría persistir una semana.»

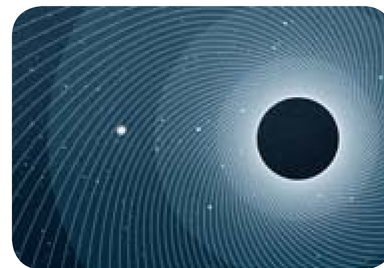
BIOLOGÍA

Un nuevo camino hacia la longevidad

David Stipp

Se ha descubierto un mecanismo ancestral que retarda el envejecimiento. Los fármacos capaces de modularlo podrían muy bien posponer el cáncer, la diabetes u otras enfermedades propias de la tercera edad.





COSMOLOGÍA

Los agujeros negros de ricitos de oro

Jenny E. Greene

Con una masa inferior a la de un millón de soles, los «pesos medios» de los agujeros negros podrían ocultar la clave de la formación de sus hermanos mayores y las galaxias.



SOSTENIBILIDAD

Más alimentos, menos energía

Michael E. Webber

Cambios en agronomía, política y hábitos alimentarios reducirían el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

FÍSICA

La ciencia de la gloria

H. Moysés Nussenzveig

Uno de los más bellos fenómenos en meteorología tiene una explicación sorprendentemente sutil. Su estudio ayuda además a predecir el papel que las nubes desempeñarán en el cambio climático.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos: 6,00 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Ideas que cambian el mundo*; J. Vilardell: *Rumbo a Marte* y *Hace...*; Joandomènec Ros: *Miniaturas deslumbrantes*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Núria Estapé: *Interruptores ocultos en la mente*; Laia Mestre Arias: *Las hormigas y el arte de la guerra*; Ana Navarrete y Marcia Ponce de León: *Introducción del dossier de arqueología*, *Genética de la cognición* y *Polifacético, flexible e ingenioso*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Panorama*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España